

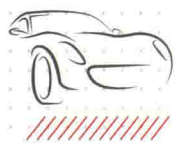


应用技术型高等教育“十三五”规划教材 >>>>

汽车类专业改革创新系列

汽车

发动机原理



主编 ◆ 陈雯 吴娜



QICHEFADONGJI
YUANLI



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据教育部应用型本科教育改革要求编写。

本书系统介绍了汽车发动机的工作原理、性能评定以及技术进展情况等。主要内容包括：工程热力学基础、发动机工作循环与性能指标、发动机的换气过程、燃料与燃烧、汽油机混合气的形成和燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、发动机的特性、发动机废气涡轮增压和发动机排放与控制等内容。每章前设有知识目标与能力目标，每章后附有知识训练与能力训练。本书注重理论与实践的结合，加强了针对性与应用性，旨在培养学生的技术应用能力。

本书可作为车辆工程、交通运输、汽车服务工程等应用型本科专业教材，也可作为在上述领域从事科研、设计制造、技术管理等方面工作的科技人员参考。

本书配有电子教案，读者可以从中国水利水电出版社网站和万水书苑免费下载，网址为：<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目（CIP）数据

汽车发动机原理 / 陈雯, 吴娜主编. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2016.5
应用技术型高等教育“十三五”规划教材. 汽车类专业改革创新系列
ISBN 978-7-5170-4288-4

I. ①汽… II. ①陈… ②吴… III. ①汽车—发动机—理论—高等学校—教材 IV. ①U464

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第088776号

策划编辑：宋俊娥 责任编辑：宋俊娥 加工编辑：高双春 封面设计：李 佳

书 名	应用技术型高等教育“十三五”规划教材（汽车类专业改革创新系列） 汽车发动机原理
作 者	主编 陈雯 吴娜
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038） 网址： www.waterpub.com.cn E-mail： mchannel@263.net （万水） sales@waterpub.com.cn
经 售	电话：（010）68367658（发行部）、82562819（万水） 北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.25印张 450千字
版 次	2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

随着汽车发动机性能研究的深入、结构的不断改进和电子技术的发展,汽车发动机原理的内容更新和补充也成为必然。本书按照汽车类人才培养目标,针对高等教育注重应用型人才培养的指导思想而编写。

本教材内容以加强针对性和应用性为原则,紧跟汽车发动机技术不断发展的形势,在教学内容现代化方面做了尝试。例如,汽油机混合气的形成以电控汽油喷射为主线展开讲述,不再涉及化油器形成混合气的内容,柴油机混合气的形成增添了柴油机燃料喷射系统的电控技术等方面的内容。每一章的内容我们都融合了汽车发动机近期发展比较成熟的新技术。

本书在讲解发动机实际循环的基础上,介绍了发动机主要性能与工作过程参数之间的内在联系,分析了影响发动机性能的各种因素,指出了合理使用发动机、提高发动机性能及实现节能减排的基本途径。本书共9章,包括:工程热力学基础、发动机工作循环与性能指标、发动机的换气过程、燃料与燃烧、汽油机混合气的形成和燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、发动机的特性、发动机废气涡轮增压和发动机排放与控制等内容。每章前设有知识目标与能力目标,每章后附有知识训练与能力训练。本书注重理论与实践的结合,旨在培养学生的技术应用能力。

本书可作为高等学校汽车类专业教学用教材,也可供相关人员学习和参考。

本书由山东交通学院陈雯、吴娜任主编。山东交通学院刁立福、郭荣春、张克松、衣丰艳、赵培全等老师对本书的编写提出了一些宝贵意见并提供了许多帮助。另外,山东交通学院庄彬、崔胜、张宇、刘伟、杨增、王正坤等为本书的资源建设和插图做了很多有益工作。编写过程中,参阅了许多作者的文献资料,在此,对他们表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中的错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2016年2月于山东交通学院

II

目 录

前言

第1章 工程热力学基础	1	2.1.3 理论循环的评价指标	31
1.1 热功转换的基础知识	2	2.1.4 理论循环的分析和比较	34
1.1.1 工质的热力状态及其基本状态参数	2	2.2 发动机的实际循环	37
1.1.2 状态参数坐标图	3	2.2.1 实际循环示功图	37
1.1.3 理想气体状态方程式	3	2.2.2 实际循环过程	38
1.1.4 工质的比热容	4	2.2.3 实际循环与理论循环比较	41
1.1.5 热力过程	6	2.3 发动机的指示指标	42
1.2 热力学第一定律	7	2.3.1 发动机循环指示功	43
1.2.1 功、热量和内能	7	2.3.2 发动机指示指标	43
1.2.2 封闭系统能量方程式	9	2.4 发动机的有效指标	45
1.2.3 开口系统稳定流动能量方程式与焓	10	2.4.1 动力性指标	45
1.2.4 熵及温熵图	12	2.4.2 经济性指标	46
1.3 气体的热力过程	14	2.4.3 强化指标	47
1.3.1 定容过程	14	2.5 发动机的环境指标	48
1.3.2 定压过程	16	2.5.1 排气品质	48
1.3.3 定温过程	17	2.5.2 噪声	48
1.3.4 绝热过程	18	2.5.3 车内空气污染	48
1.3.5 多变过程	20	2.6 机械损失与机械效率	49
1.4 热力学第二定律	22	2.6.1 机械损失	49
1.4.1 热力循环与热效率	23	2.6.2 机械效率	49
1.4.2 热力学第二定律的几种表述	24	2.6.3 机械损失的测定	50
1.4.3 卡诺循环与卡诺定理	24	2.6.4 影响机械损失与机械效率的 主要因素	51
本章小结	25	2.7 发动机的热平衡	55
第2章 发动机工作循环与性能指标	29	2.7.1 发动机所耗燃油的热量 Q_1 (kJ/h)	55
2.1 发动机的理论循环	29	2.7.2 转化为有效功的热量 Q_e (kJ/h)	55
2.1.1 发动机实际工作过程的简化	29	2.7.3 热量损失	55
2.1.2 三种基本的理论循环	30		

本章小结	57	4.2.2 燃料燃烧时所需的空气量	113
第3章 发动机的换气过程	61	4.2.3 过量空气系数与空燃比	114
3.1 四冲程发动机的换气过程	61	4.2.4 燃料和可燃混合气的热值	115
3.1.1 四冲程发动机的换气过程	62	4.3 燃料燃烧的基本知识	115
3.1.2 换气损失	64	4.3.1 自燃与点燃	115
3.2 四冲程发动机的充气效率	66	4.3.2 柴油机的低温多级着火过程	116
3.2.1 充气效率	66	4.3.3 汽油机的高温单级着火过程	116
3.2.2 影响充气效率的因素	66	4.3.4 预混合燃烧和扩散燃烧的比较	117
3.3 减少进气系统的阻力	69	本章小结	117
3.3.1 减小进气门处的阻力	70	第5章 汽油机混合气的形成和燃烧	120
3.3.2 减小进气道和进气管阻力	76	5.1 概述	121
3.3.3 减小发动机节气门体部分的阻力	76	5.1.1 化油器式汽油机	121
3.3.4 减小空气滤清器的阻力	76	5.1.2 缸外汽油喷射式汽油机	121
3.4 合理选择配气定时	76	5.1.3 缸内汽油喷射式汽油机	122
3.4.1 合理选择配气定时	77	5.2 发动机各种工况对混合气的浓度要求	122
3.4.2 发动机可变配气定时	78	5.2.1 稳定工况对混合气的浓度要求	122
3.5 进、排气管的动态效应及进气管长度	83	5.2.2 变工况对混合气的浓度要求	123
3.5.1 进气管的动态效应	83	5.3 汽油机混合气的形成	123
3.5.2 可变进气管	86	5.3.1 缸外汽油喷射式汽油机混合气的形成	123
3.5.3 惯性可变谐振增压进气系统	86	5.3.2 缸内直喷式汽油机混合气的形成	126
3.5.4 排气管的动态效应	87	5.3.3 均质压燃混合气的形成	127
3.6 二冲程发动机的换气过程	88	5.4 汽油机的燃烧室	129
3.6.1 二冲程发动机的换气过程及示功图	88	5.4.1 对汽油机燃烧室的要求	130
3.6.2 扫气泵	89	5.4.2 常用典型燃烧室结构特点	132
3.6.3 换气系统的基本方案	90	5.4.3 其他类型燃烧室	134
3.6.4 换气效率的评价	92	5.5 汽油机燃烧过程	138
3.6.5 影响扫气效率的因素	93	5.5.1 汽油机的正常燃烧	138
3.6.6 二冲程发动机的应用	93	5.5.2 汽油机的不正常燃烧	145
本章小结	94	5.5.3 汽油机燃烧过程的影响因素	148
第4章 燃料与燃烧	98	本章小结	152
4.1 发动机的燃料及使用特性	98	第6章 柴油机混合气的形成与燃烧	156
4.1.1 发动机的燃料	98	6.1 柴油机的燃烧过程	156
4.1.2 燃料的使用特性	100	6.1.1 柴油机的燃烧过程	156
4.1.3 汽油和柴油性能的差异对发动机性能的影响	107	6.1.2 燃烧放热规律	159
4.1.4 醇类燃料	108	6.2 柴油机的燃油喷射与雾化	161
4.1.5 气体燃料	110	6.2.1 燃油喷射过程	161
4.2 燃料燃烧热化学	112	6.2.2 燃油的雾化和油束特性	167
4.2.1 燃料完全燃烧的化学反应	112	6.3 混合气的形成及燃烧室	168

6.3.1	柴油机混合气的形成	168	7.7.3	发动机功率的测量	219
6.3.2	燃烧室	173	7.7.4	燃油消耗率的测量	223
6.3.3	燃烧过程的影响因素	181	7.7.5	发动机功率标定及进气修正	225
	本章小结	185		本章小结	226
第7章	发动机的特性	187	第8章	发动机废气涡轮增压	231
7.1	发动机工况与功率标定	187	8.1	发动机增压概述	231
7.1.1	发动机工况	187	8.1.1	增压的定义及衡量指标	231
7.1.2	发动机性能指标与工作过程参数间的关系	189	8.1.2	发动机增压的结构形式及分类	233
7.1.3	发动机标定工况及功率标定	190	8.2	废气涡轮增压器基本原理	235
7.2	发动机的负荷特性	190	8.2.1	离心式压气机的工作原理	237
7.2.1	汽油机负荷特性	191	8.2.2	径流式涡轮机的工作原理	242
7.2.2	柴油机负荷特性	192	8.3	废气能量的利用	245
7.2.3	汽油机、柴油机负荷特性曲线比较	193	8.3.1	发动机排气可用能量	245
7.2.4	负荷特性试验	194	8.3.2	排气涡轮增压系统的基本型式及能量利用	246
7.3	发动机的速度特性	194	8.4	车用增压发动机性能	249
7.3.1	汽油机的速度特性	194	8.4.1	涡轮增压器与柴油机联合运行的基本特点	249
7.3.2	柴油机速度特性	196	8.4.2	增压发动机在结构上的变动	253
7.3.3	汽油机、柴油机速度特性曲线对比	199	8.4.3	车用增压发动机性能	254
7.3.4	发动机扭矩特性	199	8.5	汽油机增压技术	259
7.3.5	使用外特性	201		本章小结	261
7.3.6	非稳定工况对外特性的影响	202	第9章	发动机排放与控制	263
7.3.7	速度特性试验	202	9.1	发动机排放污染物及危害	263
7.4	发动机的万有特性	203	9.2	发动机主要排放污染物的形成机理	265
7.4.1	万有特性	203	9.3	汽油机排放污染物的影响因素及控制	266
7.4.2	万有特性的制取	203	9.3.1	汽油机排放污染物生成的主要影响因素	266
7.4.3	万有特性的应用分析	204	9.3.2	汽油机的排放污染物的控制	268
7.4.4	万有特性试验	205	9.4	柴油机排放污染物的影响因素及控制	273
7.5	发动机调整特性	205	9.4.1	柴油机排放污染物生成的主要影响因素	273
7.5.1	汽油机调整特性	205	9.4.2	柴油机的排放污染物的控制	274
7.5.2	柴油机调整特性	208	9.5	排放测量与排放法规	278
7.6	柴油机的调速特性	209	9.5.1	排放测量	278
7.6.1	发动机稳定工作原理	209	9.5.2	排放法规	281
7.6.2	调速特性	210		本章小结	285
7.6.3	调速器的工作指标	215	附录	常用符号表	286
7.6.4	柴油机调速特性试验	217			
7.7	发动机台架试验	217			
7.7.1	发动机试验的分类及相关标准	217			
7.7.2	发动机试验台简介	218			

工程热力学基础



知识目标

1. 了解工质、比热容的概念及理想气体状态方程式。
2. 熟悉热力系统、平衡态、热力过程的概念。
3. 熟悉表征工质热力状态的状态参数及基本热力过程。
4. 掌握气体的基本热力过程（过程方程式、状态参数的变化、能量变化）。



能力目标

能根据热力学基础知识分析现代发动机提高其性能的理论依据。

热力学是研究物质的能量（特别是热能）、能量传递和转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个工程分支。研究的内容主要包括三部分：

(1) 介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。

(2) 介绍常用工质的基本性质。

(3) 根据热力学基本定律，结合工质的热力性质，分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环，阐明提高转换效率的正确途径。

本章仅就工程热力学基础知识作一简要阐述，为学习汽车发动机原理提供必要的理论基础和分析计算方法。

1.1 热功转换的基础知识

1.1.1 工质的热力状态及其基本状态参数

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”。

在热机中，热能向机械能的转换是通过气态工质热力状态的变化来实现的。常用的气态工质有气体和蒸汽两类，汽车发动机的工质是气体（空气和燃气），所以我们仅讨论气体的性质。

1. 热力系统

在热力学中，通常选取一定的工质作为研究的具体对象，称为热力系统，简称系统。与该系统有相互作用的其他系统称为外界。系统与外界之间的分界面称为边界。边界可以是真实的，也可以是假想的。系统通过边界与外界相互作用，进行物质和能量的交换，根据边界上的物质和能量交换情况，热力系统可分为以下几类：①开口系统，指与外界有物质交换的系统；②封闭系统，指与外界无物质交换的系统；③绝热系统，指与外界无热交换的系统；④孤立系统，指与外界既无物质交换，也无能量交换的系统。

2. 平衡状态及状态参数

平衡状态是指在没有外界宏观作用的情况下，系统中工质各部分的温度和压力均匀一致，其性质不随时间而变化的状态。处于平衡状态时，工质所有状态参数具有确定的数值。

气体的状态参数是指标志气体热力状态的物理量。常用的状态参数主要有 6 个，即压力 p 、温度 T 、比体积 v 、内能 U 、焓 H 、熵 S 。其中 p 、 T 、 v 可以直接用仪表测量，且其物理意义易被理解，所以称为描述工质状态的基本状态参数。

(1) 压力 p

气体在单位面积容器壁上所施加的垂直作用力称为压力 p 。按照分子运动论，气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的统计量，是气体施加于容器壁面上的实际压力，称为绝对压力，其单位为 Pa，或计作 N/m^2 ，工程上亦常用 kPa 与 MPa 作单位。

压力一般用压力计测量，由于测量时处于大气环境中，故只需测得绝对压力和当地大气压力的差值，即相对压力。若绝对压力记作 p ，压力计的读数压力即表压力，记作 p_g 。由图 1-1 可知，表压力是绝对压力高出当时当地大气压力 p_0 的数值。其关系式为

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



图 1-1 表压力、真空度与绝对压力的关系

如果容器内气体的绝对压力低于外界大气压力时，表压力为负数，仅取其数值，称之为



真空度，记作 p_v 。即

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

表压力、真空度都只是相对于当时当地的大气压力而言的。显然，只有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。

(2) 温度 T

温度表示气体冷热的程度。温度表示气体内部分子不规则运动的激烈程度，是与气体分子平均速度有关的一个统计量。气体的温度越高，表明气体分子的平均动能越大。

国际单位制采用热力学温度（也称为开尔文温度或绝对温度），用符号 T 表示，单位为 K。常用的另一温度为摄氏温度，用符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。1K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.15$ 。SI 容许使用摄氏温度 t ，并定义

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

必须指出，只有热力学温度才是状态参数。

(3) 比体积 v

比体积是单位质量的物质所占有的体积

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

$$V = mv$$

式中 v ——比体积； V ——体积； m ——质量。

单位体积物质的质量称为密度 ρ ，显然比体积和密度互为倒数，即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-5)$$

比体积的单位为 m^3/kg ；密度的单位为 kg/m^3 。

1.1.2 状态参数坐标图

为了分析问题方便，工程上通常采用两个独立状态参数组成坐标图来确定气体所处的状态，如图 1-2 所示，图中给出了用压力和比体积组成的压力—比体积坐标图，简称压容图或 p - v 图，还有 T - s 图（温—熵图）。因为当热力系统处于某一平衡状态时，状态参数是一确定值，故任一平衡状态在所有状态参数坐标图上均有对应的一点。

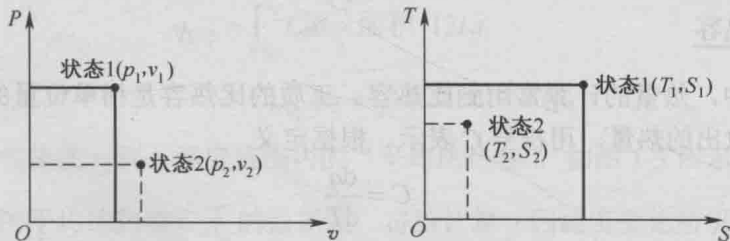


图 1-2 状态参数坐标图

1.1.3 理想气体状态方程式

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。在热力学计算和分析中，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。

根据分子运动论和对理想气体的假定，结合实验所得的一些气体定律，并综合表示成理想气体状态方程式（或称克拉贝隆方程式）。对 1kg 理想气体，其状态方程为

$$pv = RT \quad (1-6)$$

对 m kg 理想气体，其体积 $V = mv$

其状态方程为

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

式中 R ——气体常数[J/(kg·K)]。其数值取决于气体的种类。

对于 1 千摩尔 (kmol) 理想气体，其质量为 μ kg (μ 为其相对分子质量)，其体积为 $\mu v = V_m$ (m^3/kmol)，按式 (1-6) 可以得出 1kmol 理想气体的状态方程为

$$p\mu v = \mu RT \quad (1-6'')$$

即

$$pV_m = R_m T \quad (1-6''')$$

根据上式可得

$$R_m = \mu R = \frac{pV_m}{T} \quad (1-7)$$

根据阿佛加德罗定律可得同温同压下，相同体积的任何气体都具有相同数目的分子。因此，在同温同压下任何气体的千摩尔体积相等。在物理标准状况 ($p_0=1011325\text{Pa}$, $T_0=273.15\text{K}$) 条件下，千摩尔体积气体的 V_m 的数值等于 $22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ ，故对于任何理想气体 R_m 的数值都相同，因此将 R_m 称为通用气体常数， p_0 、 T_0 及 V_m 值代入式 (1-7) 可得 $R_m=8314.3\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 或

$$R = \frac{8314.3}{\mu} \quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-7')$$

理想气体状态方程式反映了理想气体三个基本状态参数间的内在联系：只要知道其中的两个参数就可以通过该方程求出第三个参数。

1.1.4 工质的比热容

在热力工程中，热量的计算常用到比热容。工质的比热容是指单位量的物质作单位温度变化时所吸收或放出的热量。用符号 C 表示。根据定义

$$C = \frac{dq}{dT} \quad (1-8)$$

式中 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 kJ 或 J。

比热容是物质的一个重要热力学性质。气体比热容数值与气体的性质、热力过程的性质和加热的状态等有关。

1. 比热容与物量单位的关系

因为工质的计量单位可用 kg、kmol、 m^3 ，故工质的比热容也有如下三种：



比质量热容 C $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 比摩尔热容 ϕ_c $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$
 比容积热容 C' $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

2. 比定压热容 C_p 和比定容热容 C_v

气体在压力不变或体积不变条件下被加热时的比热容, 分别称为比定压热容和比定容热容。比定压热容记作 $C_p[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$, 比定容热容记作 $C_v[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$, 而比定压千摩尔热容记作 $C_{p,m}[\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$, 比定容千摩尔热容记作 $C_{v,m}[\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$ 等。定义比热容比为

$$K = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}} = \frac{\mu C_p}{\mu C_v} \quad (1-9)$$

比热容比 K 又称绝热指数, 它在工程热力学中有很重要的作用, 将在以后用到。

气体定压加热过程中, 在受热温度升高的同时, 还要克服外界抵抗力而膨胀做功, 所以同样升高 1°C , 比在定容加热时需要更多的热量。实验表明, 理想气体的比定压热容值和比定容热容值的差是一个常数, 即梅耶公式

$$C_{p,m} - C_{v,m} = R_m \quad (1-9')$$

$$R_m = 8.3143 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K}) \quad (1-9'')$$

如果用 K 和 R_m 来表示 $C_{p,m}$ 、 $C_{v,m}$, 由梅耶公式可得

$$C_{v,m} = \frac{1}{K-1} R_m \quad (1-9''')$$

$$C_{p,m} = \frac{1}{K-1} R_m \quad (1-9''')$$

3. 真实比热容和平均比热容

根据大量精确的实验数据和比热容的量子力学理论, 理想气体的比热容与压力无关, 是温度的单值函数, 可表示成下式

$$C = a + bt + ct^2 + \dots \quad [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})] \quad (1-10)$$

式中, a 、 b 、 c 是常数, 它们的数值随气体的种类及加热过程的不同而异, 可由实验确定。

这种相应于每一温度下的气体比热容就叫作真实比热容。

已知气体的真实比热容随温度变化的关系为 $C = f(t)$ 时, 气体由 t_1 升到 t_2 所需的热量可按下式计算

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= \int_{t_1}^{t_2} C dt = \text{面积 } 12t_2t_1 \\ &= C_m \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = \text{面积 } 1'2't_2t_1 \end{aligned} \quad (1-11)$$

$C_m \Big|_{t_1}^{t_2}$ 称为该气体在 t_1 到 t_2 温度范围内的“平均比热容”, 如图 1-3 所示。根据真实比热容编制由 0°C 到 $t^\circ\text{C}$ 的平均比热容 $C_m \Big|_0^t$ 的数据表, 将给计算 (因温度变化所引起的) 比热容变化而导致的热量变化带来很大方便。

4. 定比热容

在实际应用中, 当温度变化不大或不要求很精确的计算时, 常忽略温度的影响而把理想气体的比热容当作常量, 只按理想气体的原子数确定比热容, 称为定比热容, 如表 1-1 所示。

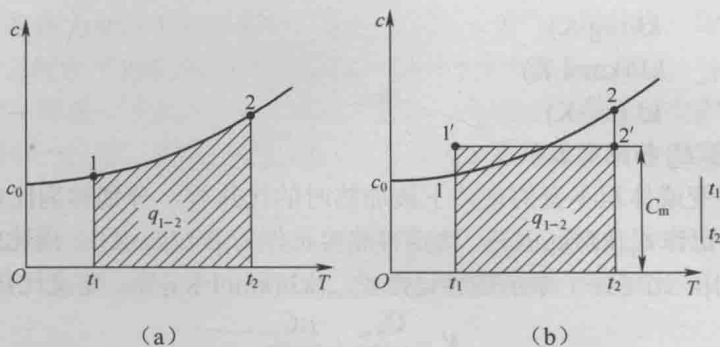


图 1-3 真实比热容与平均比热容

表 1-1 理想气体的定值比摩尔热容和比热容比

	单原子气体	双原子气体	多原子气体
$C_{v,m}$	$3/2R_m$	$5/2R_m$	$7/2R_m$
$C_{p,m}$	$5/2R_m$	$7/2R_m$	$9/2R_m$
K	1.66	1.40	1.29

1.1.5 热力过程

热力过程是指热力系统从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和。其在状态参数坐标图中表示为一条连续曲线，如图 1-4 (a) 中的 1—2 曲线。当工质从某一状态开始，经过一系列中间状态，又回复到原来状态时，则是封闭的热力过程，如图 1-4 (b) 中的闭合曲线，称为热力循环。

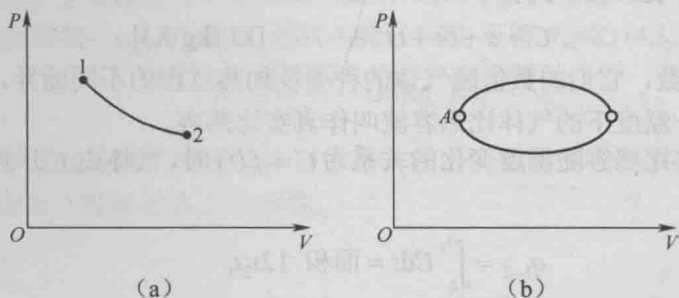


图 1-4 热力过程和热力循环

热力系统从一个平衡（均匀）状态连续经历一系列（无数个）平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为内平衡过程；否则便是内不平衡过程。

在热力学中，常用两个彼此独立的状态参数构成坐标图，例如以 p 为纵坐标、 v 为横坐标组成的坐标图（简称压容图）来进行热力学分析，如图 1-5 所示。图中 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；1—2 曲线代表一个内平衡过程。如果工质由状态 1' 变化到状态 2' 所经历的不是一个内平衡过程，则该过程无法在 $p-v$ 图上表示，仅可标出 1'、2' 两个平衡态，其过程用虚线表示。

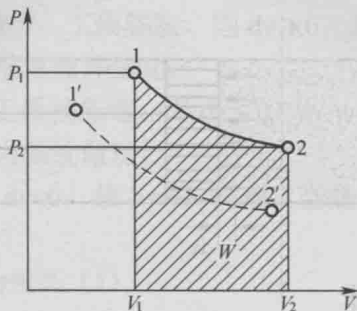


图 1-5 内平衡过程在 p - v 图上的表示

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 1-5）。如果外界给以相同大小的压缩功 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，即没有得到功，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。

1.2 热力学第一定律

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力系统中的具体应用。它建立了热力过程中的能量平衡关系，是热力学宏观分析方法的主要依据之一。

热力学第一定律可表述为：在热能与其他形式能的相互转换过程中，其总能量保持不变。根据热力学第一定律要想得到机械能就必须花费热能或其他能量，那种不花费任何能量就可以产生动力的机器是不可能存在的。因此热力学第一定律也可以表述为：不花费任何能量就可以产生功的第一类永动机是不可能制造成功的。

因热力学第一定律主要表达：工质经历受热做功的热力过程时，工质从外界接收的热量、工质因受热膨胀而对外界做出的功、同时间内工质内部储存或付出的能量三者之间的平衡关系，因此下面对功、热量和内能作必要的介绍。

1.2.1 功、热量和内能

1. 工质的膨胀功 W

功是系统在热力过程中与外界交换的能量。图 1-6 表示 1kg 工质封闭在气缸内进行一个可逆过程的膨胀做功情况。假设活塞截面面积为 A ，工质作用在活塞上的力为 pA ，活塞被推进一微小距离 dx ，在这期间，工质的膨胀极小，工质的压力近乎不变，因而工质对活塞作的功为

$$dW = pA dx = p dv \quad (1-12)$$

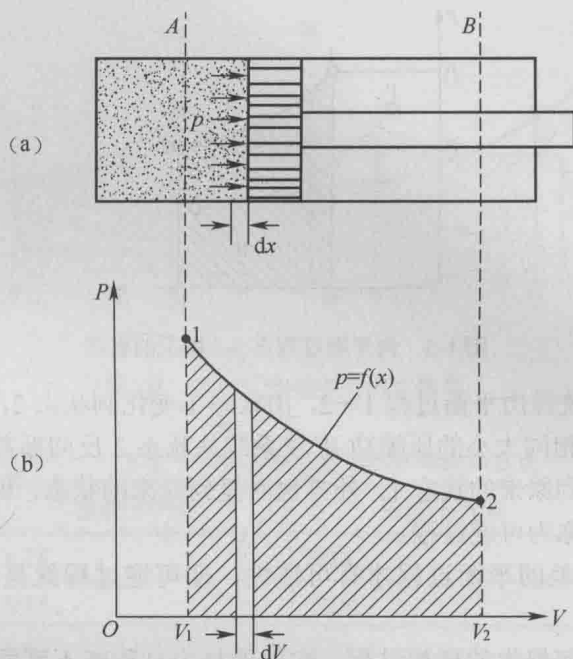


图 1-6 可逆过程的膨胀功

对可逆过程 1-2，工质由状态 1 膨胀到状态 2 所做的膨胀功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (1-13)$$

如果已知工质的初、终态参数，以及过程 1-2 的函数关系 $p = f(v)$ ，则可求得工质的膨胀功 W ，其数值等于 p - V 图上过程曲线 1-2 下面所包围的面积。因此 p - v 图也叫示功图。

若气缸中的工质为 m kg，其总容积为 $V=mv$ ，膨胀功为

$$W = mw = \int_{v_1}^{v_2} p m dv = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-14)$$

由此可见：

(1) 功可以用 p - v 图中热力过程曲线下的面积表示，即 W_{1-2} 可用面积 1234 表示，如图 1-6 (a) 所示。

(2) 功是一个过程量，而不是状态参数，过程沿不同路径，则有不同功量。如 $W_{1-a-2} \neq W_{1-b-2}$ ，如图 1-7 (b) 所示。

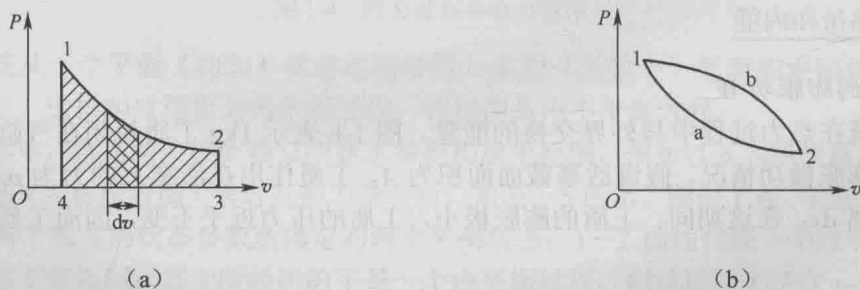


图 1-7 过程的功量和热量



(3) 当热力系统对外界做功时, 工质膨胀, 因 $dv > 0$, 故 $w > 0$; 同理, 当 $W > 0$ 时, 表示热力过程中工质膨胀, 热力系统对外界做功。

当外界对热力系统做功时, 工质被压缩, 因 $dv < 0$, 故 $w < 0$; 同理, 当 $W < 0$ 时, 表示热力过程中工质被压缩, 外界对热力系统做功。

当热力系统容积不变时, 因 $dv = 0$, 故 $w = 0$; 同理, 当热力系统与外界无功量交换时, 表示热力过程中工质容积不变。

(4) 热工计算中功的单位为焦耳 (J)。

2. 热量 Q

热量定义为系统在热力过程中由于与外界的温度不同而与之交换的能量。

热量和功一样不是热力状态的参数, 而是工质状态改变时对外效应, 即传递中的能量。因此不能说: “工质在该状态下具有多少热量。”

热量和功的不同之处在于: 功是两个物体间通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量; 热量则是两物体间通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。

按习惯, 规定外界加给系统的热量为正, 而系统放给外界的热量为负。国际单位制规定功 W 和热量 Q 的单位都用焦耳 (J)。

3. 工质的内能 (热力学能)

热力系统处于宏观静止状态时系统内所有微观粒子所具有的能量之和, 总称为工质的内能。用符号 U 表示, 单位用 J 或 kJ。

由于工程热力学主要讨论热能和机械能之间的相互转换, 不考虑化学变化和原子核反应的热力过程, 故可认为这两部分能量保持不变, 而认为工质内能是分子热运动的动能和克服分子间作用力的分子位能的总和。分子动能是由分子直线运动动能、旋转运动动能、分子内原子振动动能、原子内电子振动能等组成, 由于工质内动能与内位能都与热能有关, 故也称工质内部的热能。分子热运动的动能是温度 T 的函数; 分子间的位能是比体积 v 的函数。因此工质的内能取决于工质的温度和比体积, 即与工质的热力状态有关。一旦工质的状态发生变化, 内能也就跟着改变。单位质量工质的内能 u 也是状态参数, 其单位是 J/kg 或 kJ/kg。 m kg 工质的总内能 $U = mu$ 。

工质内能的变化值 $\Delta U = U_2 - U_1$ 只与工质的初、终状态有关, 而与工质由状态 1 变化到状态 2 所经历的过程无关。在热工计算中, 通常只需计算内能变化值, 对内能在某一状态下的值不予考虑。

对于理想气体, 因假设其分子间没有吸引力, 故理想气体分子间的位能为零, 其内能 u 仅是温度的单值函数。

1.2.2 封闭系统能量方程式

热力学第一定律应用到不同系统的能量转换过程中去, 可得到不同的能量平衡方程式。现在讨论最简单的封闭系统的能量转换情况。

封闭在气缸中的定量工质, 可作为封闭系统的典型例子, 如图 1-8 所示。假设气缸中的工质为 1kg, 热力学第一定律可表达为

$$q = \Delta u + w \quad (1-15)$$

式中 q ——外界加给每 kg 工质的热量 (J/kg); w ——每 kg 工质对外界所做的功 (J/kg); Δu

——每 kg 工质内能的增加 (J/kg)。

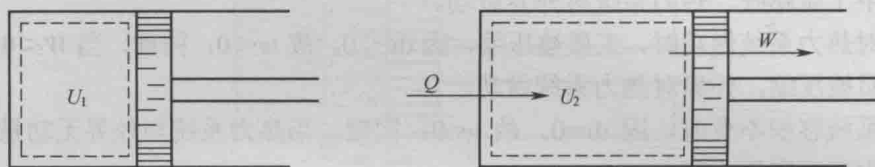


图 1-8 封闭工质的能量交换

对于 m kg 的工质，能量平衡方程式为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-15')$$

式 (1-15) 叫作热力学第一定律解析式或封闭系统能量方程式。式中各项可以是正数、零或负数。若 q 为负，表明工质对外界传出热量； w 为负，表明工质接受了外界的压缩功； Δu 为负，表明工质的内能减少。

以上公式是从热力学第一定律直接用于封闭系统而导出的，所以它们对于任何工质和任何过程都适用。

式 (1-15) 清楚地表明热量和功的转换要通过工质来完成。如果让热机工质定期回到它的初状态，周而复始，循环不息，就可不断地使热量转换为功。此时每完成一个闭合的热力过程（热力循环）工质的内能不变，即 $\oint du = 0$ 。根据式 (1-15)，在该周期内，工质实际所得到的热量将全部转变为当量的功。这正是热机工作的根本原理。由此可见，不消耗热量，或少消耗热量而连续作出超额机械功的热机是不存在的。热力学第一定律直接否定了这种创造能量的“第一类永动机”。

在上面讨论的封闭系统的能量平衡方程中，如果系统是经历比体积不变的等容过程，则由式 (1-12) 得

$$dw = pdv = 0$$

由式 (1-15) 得

$$dq = du + dw = du$$

即证明了对于理想气体，内能仅是温度的单值函数。也就是工质在等容过程中吸收或放出的热量，全部变为工质的内能增加或减少。同时根据比定容热容的定义有

$$dq = C_v dT$$

故

$$dq = C_v dT = du$$

1.2.3 开口系统稳定流动能量方程式与焓

实际上许多热机工作时，工质通常都不是永远封闭在热机中，而是连续地（气轮机、燃气轮机）或周期地（内燃机、蒸汽机）将已做功的工质排出，并重新吸入新工质，工质的热力循环要在整个动力装置内完成，对于有工质流入流出的热力设备，作为开口系统分析研究比较方便。

工质在开口系统中的流动可分为稳定流动和不稳定流动。对于工程上常见的各种热工设