



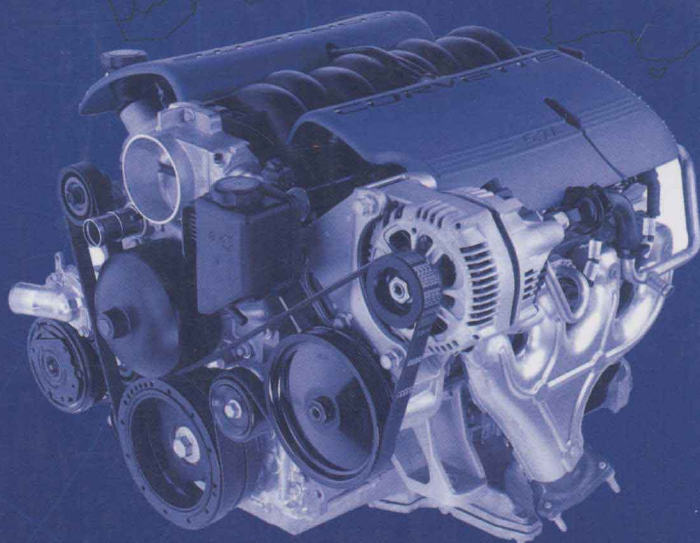
高等学校规划教材

# 汽车发动机原理与汽车理论

◎陈燕 主编

◎戴汝泉 主审

QICHECHUANGJUYUANLI  
YUQICHE LILUN



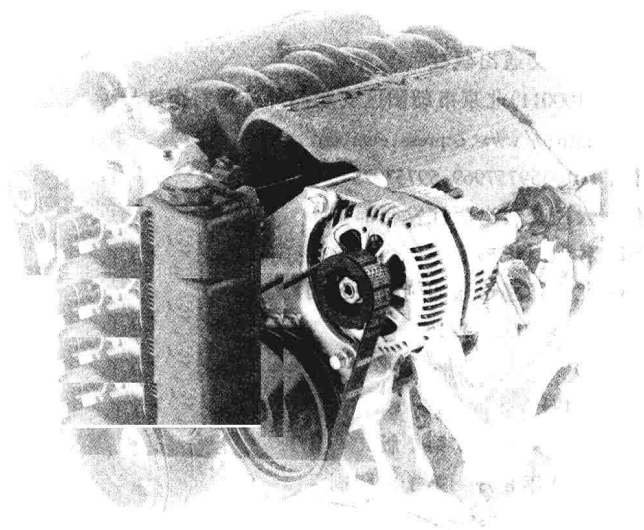
人民交通出版社  
China Communications Press



高等学校规划教材

# 汽车发动机原理与汽车理论

◎陈 燕 主 编  
◎戴汝泉 主 审



人民交通出版社

汽车发动机原理与汽车理论

汽车发动机原理与汽车理论

## 内 容 提 要

本书介绍了汽车发动机工作过程的基本理论、汽车运动过程的受力和汽车的主要性能。全书共两篇十六章。第一篇为汽车发动机原理,主要讲述发动机原理的基础知识、发动机的性能指标、发动机的换气过程、发动机的混合气形成与燃烧过程、发动机特性、发动机试验等;第二篇为汽车理论,主要讲述汽车运动过程的受力分析、汽车的动力性、制动性、燃油经济性、操纵稳定性、行驶平顺性、通过性、汽车的性能试验等。

本书可作为高等学校交通运输工程等专业的本科教材,还可作为高职、高专等院校相应专业课程的教学参考书,同时亦可供工厂、研究单位从事汽车设计、使用、试验、维修的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理与汽车理论 / 陈燕主编. —北京:  
人民交通出版社, 2010. 8  
ISBN 978-7-114-08604-5

I. ①汽… II. ①陈… III. ①汽车—发动机—理论②  
汽车工程 IV. ①U461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 158529 号

书 名: 汽车发动机原理与汽车理论

著 者: 陈 燕

责任编辑: 林宇峰

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 20

字 数: 474 千

版 次: 2010 年 8 月 第 1 版

印 次: 2010 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08604-5

印 数: 0001 ~ 3000 册

定 价: 40.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前言 *Qianyan*



汽车的诞生和发展,是人类智慧的结晶,是工业文明的产物,是社会进步的标志。根据公安部交通管理局发布的信息,至2009年8月底,我国机动车保有量已达180018512辆。如此巨大的保有量,表明汽车在从各个层面影响着人们的物质生活和精神生活。

汽车工业的快速发展,急需大量汽车和发动机设计、制造与维修方面的高级专业技术人才,作为培养这方面人才的高等院校的汽车类相关专业亦得到迅速发展。因此,教材建设已成为各高校教学管理工作的一个重要组成部分,也是提高人才培养质量的一个重要环节和手段。作者根据自己二十年教学实践积累的经验,并参阅了大量的资料和专著,本着加强基础理论,突出汽车发展的新技术、新成果、新动向,落脚于应用的原则,有针对性地编写了本教材,旨在夯实学生的理论基础,提高学生分析问题和解决问题的能力,培养学生运用发动机原理等基础理论解决工程实际问题的能力,以满足社会对汽车专业人才技术技能的要求。

本教材共两篇十六章。第一篇为汽车发动机原理,包括发动机原理基础知识、发动机热力循环及性能指标、发动机的换气过程、汽油机的燃料与燃烧过程、柴油机的燃料与燃烧过程、发动机特性、发动机性能试验。第二篇为汽车理论,包括作用于汽车的各种外力、汽车的动力性、汽车的燃油经济性、汽车动力装置参数的确定、汽车的制动性、汽车的操纵稳定性、汽车的舒适性、汽车的通过性、汽车性能试验。

本教材按照授课时数76学时编写,其中发动机原理部分授课40学时,实验教学3学时;汽车理论部分30学时,实验教学3学时。具体授课过程中可根据专业特点适当增、减学时和教学内容。

本教材由鲁东大学陈燕教授主编,杨占鹏副主编,山东交通学院戴汝泉教授主审。参加编写的作者有:鲁东大学杨占鹏编写第一章、第三章、第八章、第十四章;鲁东大学交通学院的王昕彦编写第二章、第四章、第五章、第七章;鲁东大学交通学院的姚美红编写第九章、第十章、第十一章、第十六章;鲁东大学交通学院的陈燕编写第六章、第十二章、第十三章、第十五章。

在本教材的编写过程中,得到鲁东大学交通学院王健院长、王亮申博士、于京诺教授、宋进桂教授,鲁东大学教务处董安广老师的大力帮助,山东交通学院戴汝泉教授给予了大力支持并主审本教材,在此深表感谢;同时我们对所引用的众多参考文献的作者表示深深的谢意!鲁东大学李刚、李栋、梁桂航、赵万胜、吴凯、林红旗、牟春燕、刘建霞、顾九春、李永和、倪秀英等老师为本教材出版做了许多工作,在此表示感谢!

在此我们还要对支持本教材出版的人民交通出版社、鲁东大学交通学院表示衷心的感谢。

感谢。

受编者水平所限，书中难免有错误和疏漏之处，敬请使用本教材的师生和读者批评指正。

编者

2010年4月

# 目 录 *Mulu*



## 第一篇 汽车发动机原理

<b>第一章 发动机原理基础知识</b> .....	3
第一节 气体的热力性质.....	3
第二节 热力学第一定律.....	6
第三节 基本热力过程分析.....	9
第四节 热力学第二定律 .....	17
<b>第二章 发动机热力循环及性能指标</b> .....	22
第一节 发动机的理论循环 .....	22
第二节 发动机的实际循环 .....	28
第三节 发动机的指示性能指标 .....	34
第四节 发动机的有效性能指标 .....	37
第五节 发动机的机械损失 .....	41
第六节 发动机的热平衡 .....	45
<b>第三章 发动机的换气过程</b> .....	49
第一节 四冲程发动机的换气过程 .....	49
第二节 影响发动机换气过程的因素 .....	55
第三节 换气过程对发动机性能的影响 .....	58
第四节 改善发动机换气过程的措施 .....	60
第五节 车用发动机的进气增压技术简介 .....	63
<b>第四章 汽油机的燃油与燃烧过程</b> .....	69
第一节 汽油的使用性能 .....	69
第二节 汽油机混合气的形成 .....	73
第三节 汽油机的正常燃烧过程 .....	80
第四节 汽油机的不正常燃烧过程 .....	84
第五节 影响汽油机燃烧过程的主要因素 .....	88
<b>第五章 柴油机的燃油与燃烧过程</b> .....	95
第一节 柴油的使用性能 .....	95
第二节 柴油机混合气的形成 .....	97
第三节 柴油机的燃烧过程.....	101
第四节 影响柴油机燃烧过程的主要因素.....	104


第五节	发动机的排放污染与控制	111
<b>第六章</b>	<b>发动机特性</b>	<b>116</b>
第一节	发动机工况	116
第二节	发动机负荷特性	118
第三节	发动机速度特性	122
第四节	发动机调整特性	129
第五节	柴油机调速特性	131
第六节	发动机万有特性	133
<b>第七章</b>	<b>发动机性能试验</b>	<b>136</b>
第一节	发动机试验的分类与试验项目及标准	136
第二节	发动机试验设备	140
第三节	功率与燃油消耗率的测量	150
第四节	发动机台架试验	156

## 第二篇 汽车理论

<b>第八章</b>	<b>作用于汽车的各种外力</b>	<b>161</b>
第一节	汽车的驱动力	161
第二节	汽车的行驶阻力	164
第三节	汽车的动力方程	170
第四节	汽车行驶的驱动 - 附着条件	175
<b>第九章</b>	<b>汽车的动力性</b>	<b>182</b>
第一节	汽车动力性的评价指标	182
第二节	汽车的驱动力 - 行驶阻力平衡图	183
第三节	汽车的动力特性	187
第四节	汽车的功率平衡	190
第五节	装有液力变矩器汽车的动力性	193
第六节	影响汽车动力性的主要因素	201
<b>第十章</b>	<b>汽车的燃油经济性</b>	<b>205</b>
第一节	汽车燃油经济性的评价指标	205
第二节	汽车燃油经济性的计算	208
第三节	影响汽车燃油经济性的因素	212
<b>第十一章</b>	<b>汽车动力装置参数的确定</b>	<b>217</b>
第一节	发动机功率的选择	217
第二节	传动比的选择	217
第三节	利用燃油经济性 - 加速时间曲线确定动力装置参数	223

<b>第十二章</b>	<b>汽车的制动性</b> .....	226
第一节	制动性的评价指标.....	226
第二节	汽车制动时车轮的受力分析.....	227
第三节	汽车的制动效能及其恒定性.....	233
第四节	制动时汽车的方向稳定性.....	238
第五节	理想的前、后轮制动器制动力的比例关系.....	243
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.....	248
第七节	影响汽车制动性的主要因素.....	250
<b>第十三章</b>	<b>汽车的操纵稳定性</b> .....	255
第一节	概述.....	255
第二节	汽车的极限稳定性.....	260
第三节	轮胎的侧偏特性.....	265
第四节	弹性车轮的侧向偏离对汽车转向运动的影响.....	270
第五节	线性二自由度汽车模型及其运动微分方程.....	278
<b>第十四章</b>	<b>汽车的舒适性</b> .....	282
第一节	汽车行驶平顺性.....	282
第二节	影响汽车行驶平顺性的主要因素.....	285
第三节	汽车噪声.....	287
第四节	汽车的内部环境.....	291
<b>第十五章</b>	<b>汽车的通过性</b> .....	295
第一节	间隙失效与汽车通过性的几何参数.....	295
第二节	汽车通过性的支承与牵引参数.....	297
第三节	影响汽车通过性的主要因素.....	298
<b>第十六章</b>	<b>汽车性能试验</b> .....	301
第一节	汽车动力性试验.....	301
第二节	汽车燃油经济性试验.....	304
第三节	汽车制动性试验.....	307
<b>参考文献</b>	.....	312



The background features a stylized, textured world map. In the foreground, a globe is centered, resting on a grid of lines that recede into the distance, creating a sense of depth and perspective. The overall aesthetic is technical and global.

## 第一篇 汽车发动机原理

汽车发动机原理主要研究发动机的各个工作过程，以发动机的性能指标为主线，分析影响发动机各个工作过程的因素，最终找到提高发动机性能的途径。



# 第一章 发动机原理基础知识

发动机原理的基础是工程热力学，工程热力学是一门研究热能与机械能之间相互转换的科学。它从工程技术的角度出发，把热力学基本定律应用到工程技术领域，通过分析热力过程和热力循环，讨论热功转换的规律和方法，从理论上探讨提高发动机性能的途径。

本章重点介绍学习发动机原理所必需的工程热力学基础知识。

## 第一节 气体的热力性质

### 一、基本概念

#### 1. 工质

汽车发动机是将燃油燃烧的热能转换为机械能的机器。在发动机工作过程中，热能与机械能的相互转换是通过汽缸内的可燃混合气的进气、压缩、燃烧、膨胀做功等热力过程来实现的。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。

因为气体具有良好的流动性和膨胀性，能有效地实现热功转换，热力性质最简单，所以汽车发动机采用的工质都是气体。

#### 2. 热力系统

研究发动机的工作过程，主要是研究发动机汽缸内气体的热力过程。在热力学中，把某一宏观尺寸范围内的工质作为研究的具体对象，称为热力系统；把热力系统以外与热功转换过程有关的其他物体统称为外界。热力系统分为：开口系统、闭口系统、绝热系统、孤立系统。

#### 3. 热力状态

在发动机依靠工质将热能转换为机械能的过程中，作为工质的气体本身也在不断变化，在宏观上表现为气体的物理特性，如压力、温度、体积等在不断变化；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”。

#### 4. 热力过程

在热力学中，当热力系统从某一初始状态变化到另一状态所经历的整个过程称为热力过程。在热力过程中，热力系统的状态会随时间的变化而变化。

#### 5. 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 1-1 所示为压力—质量体积坐标图，简称压容图或  $p-v$  图。

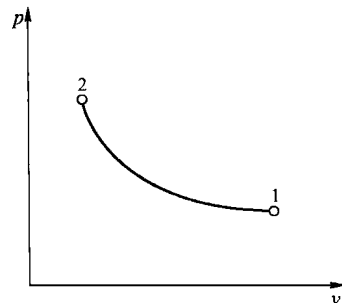


图 1-1 压容图

## 二、工质的基本状态参数

工质的热力状态常用一些物理量来描述，用于描述工质热力状态的物理量称为“状态参数”。例如压力、质量体积、温度三个可直接测得的状态参数，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，应当注意：状态参数只取决于气体所处的状态，因此，对应于某个给定的状态，所有状态参数都应有确定的数值，否则就不是状态参数。

### 1. 质量体积

单位质量的工质所占有的容积称为质量体积，用符号  $v$  表示，单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。按定义有公式

$$v = \frac{V}{m}$$

式中： $V$ ——工质的容积， $\text{m}^3$ ；

$m$ ——工质的质量， $\text{kg}$ 。

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

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$$

即物质的质量体积与密度互为倒数关系。

### 2. 压力

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对单位面积容器壁所施加的垂直作用力。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，气体本身的重量可以忽略不计，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  $\text{Pa}$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。因为帕的单位很小，所以工程中常用千帕 ( $\text{kPa}$ ) 或兆帕 ( $\text{MPa}$ ) 作单位。

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

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

气体作用在容器壁上的真实压力也称为绝对压力，它表示工质的真实状态，是气体的状态参数之一。但绝大多数用来测量压力的仪器不能指示出绝对压力，而只能指示出绝对压力与周围大气压  $p_0$  间的差值，绝对压力通过换算才能得到。当气体的绝对压力大于大气压力时，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 1-2 所示。

显然大气压力是经常变化的，所以即使绝对压力不变

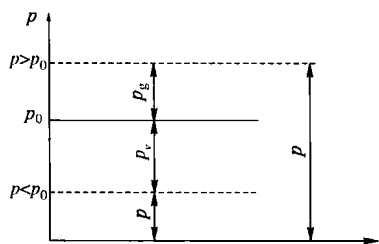


图 1-2 绝对压力、表压力及真空度的关系



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,它表示工质的真实状态。

### 3. 温度

在日常生活中,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,就会有热量传递,通常是冷的物体吸收热量使温度升高,热的物体放出热量使温度降低。经过一段时间后,两物体的温度达到相同时就不再发生热量传递。

按照分子运动学说,温度是描述物体内部大量分子无规则运动剧烈程度的物理量,是分子运动能量的表示。气体的温度越高,分子平均运动速度高,气体内部分子的平均动能就越大。

热力学中所用的温度是开氏温度,用符号  $T$  表示,单位为开尔文,简称开,单位符号为 K。K 是国际单位制 (SI) 的基本单位。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 (水蒸气) 三相平衡共存的温度,作为定义热力学温度的基准,并严格规定水的三相点温度为 273.16K,而热力学温度 1K 等于三相点温度的  $1/273.16$ 。

工程上所用的摄氏温度是由热力学温度导出的。摄氏温度所确定的温度用  $t$  表示,单位为摄氏度,符号为  $^{\circ}\text{C}$ ,摄氏温度与开氏温度的关系为

$$t = T - 273.15$$

由此可见,摄氏温度的零点 ( $t = 0$ ) 与水的三相点并不严格相等。三相点 273.16K 相当于摄氏  $0.01^{\circ}\text{C}$ ,0K 相当于  $-273.15^{\circ}\text{C}$ 。

必须注意,只有开氏温度才是状态参数,开氏温度不可能有负值。

## 三、理想气体状态方程

### 1. 理想气体

在热力学中,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,并且分子之间也没有吸引力的气体。理想气体仅是一种理想的模型,在实际中并不存在。但实验证明当压力较低或温度较高时,一般实际气体的质量体积较大,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可忽略不计,它的性质就比较接近于理想气体,所以通常把汽缸内的气体近似看作理想气体。

### 2. 理想气体状态方程

理想气体的温度、压力和质量体积三者之间的关系式,称为理想气体状态方程。

对于 1kg 的理想气体,状态方程式为

$$p\nu = RT$$

对于  $m$  (kg) 的理想气体,其状态方程则为

$$pV = mRT$$

式中:  $V$ —— $m$  (kg) 理想气体的总容积,  $V = m\nu$ ;

$R$ ——气体常数,其数值取决于气体的性质,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

理想气体状态方程给出了某一状态下三个基本状态参数之间的关系,如果任意两个状态参数已定,则第三个状态参数可由状态方程式给出。

## 第二节 热力学第一定律

### 一、功、热量、内能

#### 1. 功

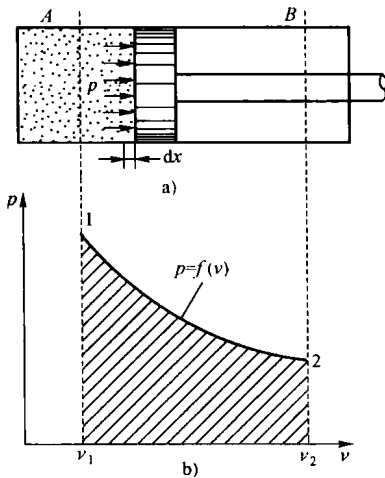


图 1-3 气体对外所作的功

观察图 1-3 所示汽缸中气体组成的热力系统。当气体膨胀推动活塞右移时，则气体对外作功；反之，当活塞左移，压缩气体时，则外界对气体作功，或称气体接受了外界的功。可见，功是系统与外界间通过宏观的物体运动传递的能量，它的全部效果表现为使物体改变宏观运动的状态。功一般用符号  $W$  表示，单位为焦耳，单位符号为“J”，常用“kJ”为单位。

如图 1-3 所示，设封闭汽缸内的气体质量为  $1\text{kg}$ ，活塞横截面积为  $A (\text{m}^2)$ ，汽缸的压力为  $p$ ，活塞被气体推动一个微小距离  $dx$ ，在此期间， $1\text{kg}$  气体容积的微小变化量为

$$dv = A dx$$

若不考虑活塞与汽缸之间的摩擦和漏气等损失，按力学上的定义功等于物体所受的力与在力作用下使物体移动的距离之积，则  $1\text{kg}$  气体对外界所作的微元功为

$$dw = p A dx = p dv$$

若已知气体从状态 1 变化到状态 2 的过程中，气体压力  $p$  与质量体积  $v$  之间的函数关系，则  $1\text{kg}$  气体对外界所作的功为

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

根据积分原理， $1\text{kg}$  气体对外界所作的功也就是在  $p-v$  图上曲线下面的面积。因此， $p-v$  图又可称为示功图。

若汽缸内的气体质量为  $m$ ，其总容积  $V = mv$ ，则气体从状态 1 变化到状态 2 对外所作的功为

$$W = mw = m \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} p m dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV$$

从功的计算公式可以看出，气体状态发生变化时，工质与外界所交换的功不仅与气体的初、终状态有关，而且与气体在初、终状态之间所经历的热力过程有关，所以功不是状态参数，只是一个过程函数，不能说系统在某一状态有多少功，只能说系统在某一热力过程中对外作了多少功，或从外界得到了多少功。

热力过程的性质不同，如吸热或放热等，气体压力  $p$  和质量体积  $v$  之间的函数关系也不同。热力学中规定，当气体的状态变化使容积增加时，工质对外界所作的功，即气体膨胀功为正；反之，当气体的状态变化使容积减小时，即外界对气体所作的压缩功为负。



## 2. 热量

在工程实践中经常要用到热量的概念。当温度不同的两个物体相互接触时，热的物体要变冷，冷的物体要变热，最后达到热平衡，两个物体具有相同的温度。对于这种现象，引入热量的概念就可以解释，在上述过程中，有热量从高温物体传递给低温物体，使低温物体温度升高，而高温物体自身的温度则降低，直到两物体的温度相等后，不再有热量传递。

物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，它们的分子在紊乱运动中会互相碰撞，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；在固体间分子动能的传递也与此类似。所以，热量仅仅是由于温度不同，在两物体间通过微观的分子运动作用而传递的能量。传递热量的多少与两个物体大小和温度差有关，由于随着两物体温度的变化，温度差逐渐减小，高温物体向低温物体传递热量的速度也逐渐变慢。

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，只能说系统在某一热力过程中对外放出了多少热量，或从外界吸收了多少热量。根据状态参数的定义，功和热量都不是气体的状态参数，而是过程函数，它们的数值与气体所处的状态无关，是在热力过程中系统与外界之间传递的能量。因此，不能说“气体在某一状态下具有多少功或热量”，而只能说“气体在某一热力过程中与外界交换了多少功或热量”。热量和功的根本区别在于：功是两物体间通过宏观的物体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。

通常 1kg 气体与外界传递的热量用符号  $q$  表示， $m$ kg 气体与外界传递的热量用符号  $Q$  表示，热量的国际单位与功一样为焦耳，单位符号为“J”，也常用“kJ”为单位。

在用热力学方法分析发动机工作过程时，通常用比热容来计算热量。比热容是指单位量的物质温度每变化 1K 时吸收或放出的热量，用符号  $c$  表示，即

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

式中： $dq$ ——单位量的物质在温度变化  $dT$  时吸收或放出的热量。

气体比热容的数值与物量单位、气体的种类、热力过程及加热（或放热）时的温度有关。当物量单位、气体的种类、气体经历的热力过程一定时，气体的比热容是温度的函数，因此热量可用下列方法进行计算：

1kg 气体的温度发生微量变化  $dT$  时，吸收或放出的微元热量  $dq$  为

$$dq = cdT$$

1kg 气体的温度从  $T_1$  变化到  $T_2$  时，吸收或放出的热量  $q$  为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} cdT$$

$m$ kg 气体的温度从  $T_1$  变化到  $T_2$  时，吸收或放出的热量  $Q$  为

$$Q = mq = \int_{T_1}^{T_2} cmdT$$

在热力学中规定，气体从外界吸收热量为正，而气体向外界放出热量为负。

## 3. 内能

气体的内能就是指气体内部所具有的各种能量的总和，主要由气体分子运动的动能和分子间位能组成。分子运动的动能包括分子直线运动动能、旋转运动动能、分子内原子振动能

能、原子内的电子振动动能等，它仅取决于气体的温度，随温度的升高分子运动的动能增大。分子间的位能是分子间相互吸引而形成的，它取决于气体的压力或质量体积。当气体的状态一定时，气体的温度、压力和质量体积都有固定的数值，其内能也必然有固定的数值，所以内能也是气体的状态参数。

对于理想气体而言，因假设其分子间没有引力，也就没有位能，所以理想气体的内能仅指其内部动能，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，不论其间经历怎样的热力过程，其内能的变化量  $\Delta u$  都相等。

1kg 气体的内能用符号  $u$  表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg，则

$$u = f(T)$$

在对发动机进行的热功转换过程进行分析时，通常只需计算气体内能的变化值，而不需确定在某一状态下气体内能有多少。1kg 气体的温度从  $T_1$  变化到  $T_2$  时，其内能的变化量为

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

$m$ kg 气体的内能用符号  $U$  表示，单位为 J 或 kJ，温度从  $T_1$  变化到  $T_2$  时，其内能的变化量为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m[f(T_2) - f(T_1)]$$

在热力学中规定，气体的内能增加为正，内能减少为负。

## 二、热力学第一定律

### 1. 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。为了要获得一定量的功，必须消耗一定量的热；反之，消耗一定量的功，必会产生一定量的热。

假设  $Q$  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

$$Q = W$$

热力学第一定律可以应用于任何热力系统，其能量转换过程都必须遵循的公式：

$$\text{输入系统的能量} = \text{系统储存能量的变化} + \text{系统输出的能量}$$

热力学第一定律的意义在于告诉人们，不消耗能量而可获得机械功的第一类永动机是不能被制成的。

### 2. 能量平衡方程

在利用气体实现热功转换的发动机工作过程中，气体与外界交换的机械功和热量与其内能的变化量三者之间遵循能量守恒原则，能量平衡关系由能量平衡方程表示。

假设封闭在汽缸中的工质为 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 ( $p_2, v_2, T_2, u_2$ )，如图 1-3 所示；过程中工质从外界吸收热量  $q$ ，并对外作功  $w$ 。此时系统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：





对于 1kg 工质的微元过程

$$dq = du + dw$$

对 1kg 工质在由状态 1 变化到状态 2 所经历的过程中, 如果气体与外界交换的热量为  $q_{1-2}$ , 机械功为  $w_{1-2}$ , 内能的变化量为  $u_2 - u_1$ , 三者之间的平衡关系可用能量平衡方程表示为

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 + w_{1-2}$$

$m$ kg 气体由状态 1 变化到状态 2 所经历的过程中, 则有

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + W_{1-2}$$

上述能量平衡方程表明, 气体在经历的状态变化过程中, 从外界吸收的热量等于其内能的增加量与对外所作的机械功之和。注意: 方程中各项可以是正数或负数, 规定与前述相同, 总结于表 1-1。

功、热量和内能的正负

表 1-1

热量 $q$ 或 $Q$	工质从外界吸收热量	正
	工质向外界放出热量	负
功 $w$ 或 $W$	工质膨胀对外作功	正
	压缩工质消耗外功	负
内能增量 $\Delta u$ 或 $\Delta U$	工质内能增加	正
	工质内能减少	负

### 第三节 基本热力过程分析

发动机是借助于工质进行各种热力过程而实现热功转换的。为此就要研究各种热力过程, 以确定过程中工质状态变化的规律和能量转换的规律。通常把热力过程中工质压力随质量体积而变化的关系称为过程方程式。

气体的热力过程类型很多, 我们首先讨论几种典型的热力过程(定容过程、定压过程、定温过程及绝热过程), 然后再讨论更为普遍的多变过程。为便于分析计算, 假定工质是 1kg 理想气体, 其比热容也视为定值。

#### 一、定容过程

当气体的质量体积保持不变, 气体状态变化经历的过程称为定容过程。

##### 1. 过程方程式

$$v = \text{常数}$$

在  $p-v$  图上, 定容过程曲线为一条垂直于  $v$  轴的直线, 如图 1-4 所示。

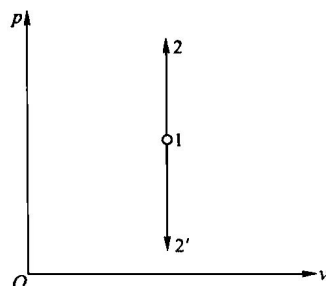


图 1-4 定容过程  $p-v$  图

##### 2. 气体状态参数的变化

根据气体状态方程式  $pv = RT$ , 当气体从状态 1 ( $p_1, v_1, T_1$ )