



21 世纪高等学校教材 <<<<

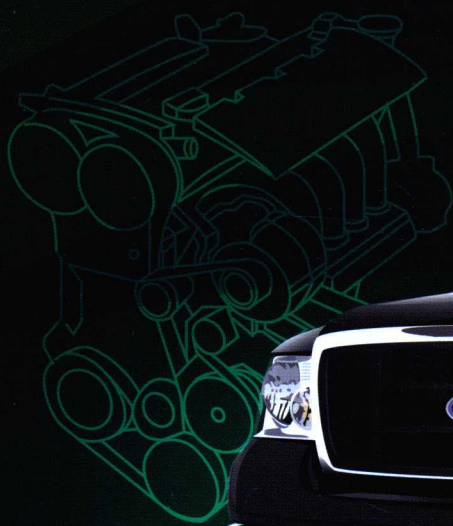
普通高等教育“十三五”汽车类专业(方向)规划教材

# 汽车发动机原理

安永东 主 编

朱荣福 副主编

QICHE  
FADONGJI  
YUANLI



化学工业出版社



21世纪高等学校教材 <<<<

普通高等教育“十三五”汽车类专业(方向)规划教材

# 汽车发动机原理

安永东 主 编

朱荣福 副主编

QICHE  
FADONGJI  
YUANLI



化学工业出版社

·北京·

本书以“热力学基础——发动机循环——混合气形成及燃烧——发动机特性——发动机排放控制”为主线讲述了汽车发动机工作原理，主要内容包括汽车发动机的实际循环与性能指标、发动机的换气过程、发动机燃料与燃烧、汽油机和柴油机混合气形成与燃烧、发动机特性、发动机排放与噪声控制技术以及电动汽车。

本书可作为交通运输工程、车辆工程、汽车服务工程、汽车维修、交通工程等相关专业高等教育的教材和参考书，也可作为从事汽车发动机相关技术人员的参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车发动机原理/安永东主编. —北京: 化学工业出版社, 2015. 12

21 世纪高等学校教材 普通高等教育“十三五”汽车类专业(方向)规划教材

ISBN 978-7-122-25430-6

I. ①汽… II. ①安… 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 (2015) 第 250128 号

---

责任编辑: 韩庆利  
责任校对: 王素芹

装帧设计: 史利平

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 398 千字 2016 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

FOREWORD

汽车发动机原理是汽车类专业一门重要技术基础课，是学好后续相关专业课程的基础，也是从事汽车发动机研发、生产及应用等专业技术人员所必备的技术基础。

编者依据汽车类专业高等教育的发展方向及学科建设成果，以及多年从事汽车发动机原理课程的教学经验，对本书的结构体系和编写内容作了精心的筹划和安排，构建了“热力学基础——发动机循环——混合气形成及燃烧——发动机特性——发动机排放控制”的编写主线，使本书呈现出从理论支撑到技术应用的内容框架，使读者在掌握相关基础理论后，再学习汽车发动机相关技术。同时在相应内容上又融入了汽车发动机的最新技术，如在汽油机混合气形成与燃烧中，加入了汽油机缸内直喷稀薄燃烧技术，在柴油机混合气形成与燃烧中，加入了柴油均质混合气压燃技术及复合燃烧新技术。

本书内容层次分明，条理清晰，易于学习，注重理论联系实际，突出针对性、先进性和实践性，有助于读者学习和掌握汽车发动机原理课程的相关知识。

本书由黑龙江工程学院安永东担任主编，朱荣福担任副主编，孙远涛、王辉参编。安永东编写了第四、五、六章，朱荣福编写了第一、二、七章，孙远涛编写了第八章，王辉编写了第三章。

本书由哈尔滨剑桥学院闻鸿莉担任主审，对本书的编写结构和内容上提出了宝贵的修改意见和建议，同时也得到了哈尔滨工程大学安少军，东北林业大学韩大明，哈尔滨东方学院孙曙光、王春风诸多建议，在此一并表示感谢。

本书配套电子课件，可赠送给用书的院校和老师，如果需要，可登登 [www.cipedu.com.cn](http://www.cipedu.com.cn) 下载。

由于编者水平有限，疏漏之处在所难免，竭诚希望广大读者提出宝贵意见。

编者



## 第 1 章 发动机的实际循环与性能指标 1

1.1 发动机的理论循环 .....	1
1.1.1 热工转换基础 .....	1
1.1.2 热力循环与热效率 .....	8
1.1.3 发动机理论循环 .....	11
1.2 发动机的实际循环 .....	15
1.2.1 实际循环与理论循环的主要差异 .....	15
1.2.2 实际循环与热损失 .....	16
1.3 发动机的性能指标 .....	18
1.3.1 发动机指示指标 .....	19
1.3.2 发动机有效指标 .....	20
1.4 发动机的机械损失 .....	22
1.4.1 机械效率 .....	22
1.4.2 机械损失的组成 .....	22
1.4.3 机械损失的测定 .....	23
1.5 发动机热平衡 .....	26
1.6 提高发动机性能指标的途径 .....	27
1.6.1 发动机热损失的合理利用 .....	27
1.6.2 提高发动机性能指标的途径 .....	30
复习思考题 .....	31

## 第 2 章 发动机的换气过程 33

2.1 发动机的换气过程 .....	33
2.1.1 换气过程 .....	33
2.1.2 换气损失 .....	36
2.2 发动机的充量系数 .....	37
2.2.1 充量系数 .....	37
2.2.2 影响充量系数的因素 .....	37
2.2.3 提高充量系数的措施 .....	38

2.3	可变技术 .....	41
2.3.1	可变进气系统 .....	41
2.3.2	可变气门正时与升程 .....	44
2.4	发动机增压技术 .....	48
2.4.1	增压技术概述 .....	48
2.4.2	增压发动机的性能 .....	49
2.4.3	废气涡轮增压系统 .....	50
	复习思考题 .....	54

### 第 3 章 发动机燃料与燃烧

55

3.1	发动机传统燃料 .....	55
3.1.1	汽油和柴油的使用性能 .....	55
3.1.2	汽油和柴油性能差异对发动机工作模式的影响 .....	60
3.2	发动机代用燃料 .....	61
3.2.1	气体燃料 .....	61
3.2.2	液体燃料 .....	64
3.3	燃烧热化学 .....	66
3.3.1	燃烧值和发热值 .....	66
3.3.2	燃料燃烧所需空气量 .....	66
3.3.3	过量空气系数和空燃比 .....	67
3.4	燃料的着火和燃烧 .....	68
3.4.1	着火机理 .....	68
3.4.2	发动机着火和燃烧方式 .....	70
	复习思考题 .....	71

### 第 4 章 汽油机混合气形成与燃烧

72

4.1	汽油机混合气形成 .....	72
4.1.1	汽油机混合气的形成方法 .....	72
4.1.2	汽油机混合气浓度与发动机性能的关系 .....	73
4.1.3	汽油机各工况下的理想混合气浓度 .....	74
4.2	电控汽油喷射系统 .....	75
4.2.1	电控汽油喷射系统概述 .....	75
4.2.2	电控汽油喷射系统燃料喷射量的控制 .....	77
4.3	汽油机燃烧过程 .....	81
4.3.1	正常燃烧过程 .....	81
4.3.2	不规则燃烧 .....	82
4.3.3	不正常燃烧 .....	84
4.3.4	运行参数对燃烧过程的影响 .....	85

4.4	汽油机燃烧室	88
4.4.1	对燃烧室的基本要求	88
4.4.2	燃烧室内气流特性	89
4.4.3	典型燃烧室	90
4.5	汽油机稀薄燃烧技术	92
4.5.1	稀薄燃烧技术概述	92
4.5.2	进气道喷射稀燃系统(PFI)	94
4.5.3	直接喷射稀燃系统(GDI)	98
4.5.4	均质混合气压燃系统(HCCI)	111
	复习思考题	113

## 第5章 柴油机混合气形成与燃烧 114

5.1	柴油机混合气形成	114
5.1.1	混合气形成方式	114
5.1.2	燃油的喷射与雾化	116
5.1.3	空气运动对混合气形成的影响	124
5.2	柴油机电控喷射技术	125
5.2.1	位置控制式燃油喷射系统	126
5.2.2	时间控制式电控燃油喷射系统	127
5.2.3	时间-压力控制式电控燃油喷射系统	129
5.3	柴油机燃烧与放热	130
5.3.1	燃烧过程	130
5.3.2	燃烧放热规律	132
5.3.3	燃烧过程的优化	135
5.4	柴油机燃烧室	136
5.4.1	直喷式燃烧室	136
5.4.2	分隔式燃烧室	140
5.4.3	燃烧室选型	142
5.5	柴油机燃烧新技术	143
5.5.1	柴油均质混合气压燃技术	143
5.5.2	复合燃烧新技术	145
	复习思考题	146

## 第6章 发动机特性 147

6.1	概述	147
6.1.1	发动机工况	147
6.1.2	发动机台架试验	149
6.1.3	发动机特性分析方法	150
6.2	发动机速度特性	151

6.2.1	汽油机速度特性	151
6.2.2	柴油机速度特性	152
6.2.3	汽油机和柴油机速度特性对比分析	153
6.3	发动机负荷特性	154
6.3.1	汽油机负荷特性	155
6.3.2	柴油机负荷特性	155
6.3.3	汽油机和柴油机负荷特性对比分析	156
6.4	发动机转矩特性	157
6.4.1	发动机转矩特性参数	157
6.4.2	汽油机和柴油机转矩特性对比分析	158
6.4.3	柴油机调速特性	159
6.5	发动机万有特性	163
6.5.1	万有特性的制作	163
6.5.2	汽油机和柴油机万有特性的特点	164
	复习思考题	165

## 第 7 章 发动机排放与噪声控制技术

166

7.1	汽油机排放与控制技术	166
7.1.1	汽油机排放污染物生成及影响因素	166
7.1.2	汽油机排放控制技术	172
7.2	柴油机排放与控制技术	177
7.2.1	柴油机排放污染物生成及影响因素	177
7.2.2	柴油机排放控制技术	179
7.3	发动机噪声污染与控制技术	185
7.3.1	发动机噪声评价与标准	185
7.3.2	发动机噪声来源	188
7.3.3	发动机噪声控制	190
	复习思考题	194

## 第 8 章 电动汽车

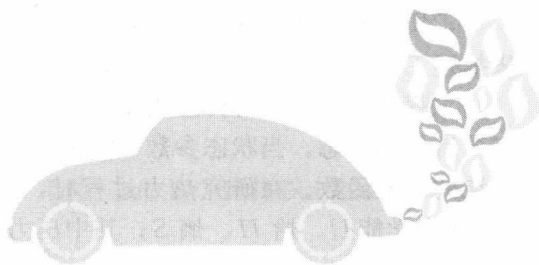
195

8.1	电动汽车概述	195
8.2	纯电动汽车	195
8.2.1	纯电动汽车概述	195
8.2.2	纯电动汽车的结构与原理	197
8.3	混合动力汽车	201
8.3.1	混合动力汽车概述	201
8.3.2	混合动力汽车结构与原理	206
8.4	燃料电池汽车	213



8.4.1	燃料电池概述	213
8.4.2	燃料电池汽车概述	217
8.4.3	燃料电池汽车的结构与原理	218
8.5	太阳能电池汽车	228
8.5.1	太阳能电池汽车概述	228
8.5.2	太阳能电池汽车的结构与原理	231
8.5.3	太阳能电池汽车的关键技术	234

# 第①章



## 发动机的实际循环与性能指标

发动机的工作循环是周期性地 将燃料燃烧所产生的热能转变为机械能的过程，它由活塞往复运动形成的进气、压缩、膨胀和排气等多个有序联系、重复进行的过程组成。在发动机的这些过程中，工质的温度、压力、成分和流动状态等时刻发生着非常复杂的变化，因而需要根据内燃机工作过程的特点，将实际循环简化，即建立发动机的理论循环，分析研究影响发动机循环效率的主要因素。与理论循环相比，发动机的实际循环存在着许多不可逆损失，分析这些损失，有助于掌握两者之间的差异及成因，为提高发动机工作过程的热效率指明方向。

发动机的工作指标很多，主要有动力性能指标（功率、转矩、转速）、经济性能指标（燃料与润滑油消耗率）、运转性能指标（冷启动性能、噪声和排气品质）和耐久可靠性指标（大修或更换零件之间的最长运行时间与无故障长期工作能力）。发动机的动力性能指标、经济性能指标与发动机循环热效率的相互关系是本章讨论的重点。

### 1.1 发动机的理论循环

热能转换为机械能需借助专用设备和做功物质，所需设备称为热机。热机的形式有多种，如蒸汽机、汽车发动机以及燃气轮机等。

#### 1.1.1 热工转换基础

##### 1. 工质及状态参数

将所有研究的对象与周围环境分隔开来，这种人为分割出来的对象，称为热力系统，简称系统。边界以外与系统相互作用的物体，称为外界或环境。热力系统如图 1-1 所示。

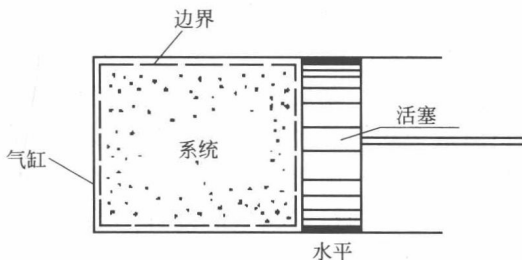


图 1-1 热力系统

按系统与外界有无物质交换，可分为闭口系统和开口系统两类。其中，闭口系统是指系统内外无物质交换，也称为控制质量系统。开口系统是指系统内外有物质交换，也称为控制体积系统。

工质是指能实现热能和机械能相互转化的媒介物质，一般是气态物质。状态参数是指用来描述工质所处状态的宏观物理量。例如：温度、压力等。

工程热力学只从总体上去研究工质所处的状态及其变化规律，所以只采用宏观量来描写工质所处的状态。当状态参数一旦完全确定，工质的状态也就确定了，因而状态参数是热力系统的单值函数。在研究热力过程时，常用的状态参数有六个：压力  $p$ 、温度  $T$ 、比体积  $v$ 、热力学能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$ ；其中压力  $p$ 、温度  $T$  及比体积  $v$ ，使用最多，称为基本状态参数。

工质的宏观性质不随时间变化的状态称为平衡状态，只有在平衡状态下的工质状态参数才是确定的。

### (1) 压力

单位面积上所受的垂直作用力称为压力（压强），气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热力运动中对容器壁频繁碰撞的结果。压力  $p$  的表达式为：

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中， $p$  为压力； $F$  为垂直作用力； $A$  为作用面积。

由于测量压力的测压元件（压力计）处于某种环境压力作用下，因此不能直接测得绝对压力，而只能测出绝对压力和当时当地的大气压的差值，称为表压力或真空度。用  $p$  表示工质的绝对压力， $p_b$  表示大气压力（环境压力）， $p_e$  表示表压力， $p_v$  表示真空度，绝对压力、表压力、真空度的换算关系如图 1-2 所示，即：

当绝对压力大于大气压力时：  $p = p_b + p_e$

当绝对压力小于大气压力时：  $p = p_b - p_v$

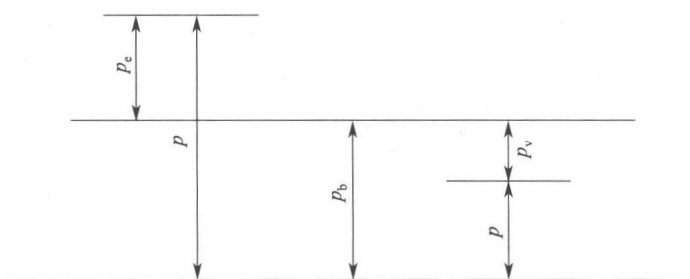


图 1-2 几种压力之间的关系

国际单位制中，压力单位为  $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$ ，中文名称为帕。工程上常用较大单位  $\text{MPa}$  或  $\text{bar}$ 。 $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ ； $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ 。

### (2) 温度

从宏观上，温度是物体冷热程度的标志。从微观上，温度标志物质分子热运动的激烈程度。当两个物体接触时，通过接触表面，能量从高温一侧传递给低温一侧，能量传递的方向总是从高温侧传向低温侧。

测量温度的仪器叫做温度计，温度计的感应元件应随物体冷热程度的不同有显著的变化。温度的数值表示叫做温标。国际上规定热力学温标作为测量温度的最基本温标，它根据热力学第二定律的基本原理制定的，与测量的温度无关，可以成为度量温度的标准。

热力学温度单位是开尔文，符号  $\text{K}$ （开），把水的三相点的温度，即水的固相、气相、液相平衡共存状态的温度作为单一基准点，并规定为  $273.16\text{K}$ ，热力学温度  $\text{K}$  是水的三相点温度的  $1/273.16$ 。

摄氏度  $t$  与热力学温度  $T$  的关系为:

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.16 \quad (1-2)$$

可知: 摄氏度与热力学温度无实质差异, 而仅仅零点的取值不同。

### (3) 比体积 (比容)

单位质量的物质所占有的体积称为比体积 (比容), 单位:  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。比体积  $v$  的表达式为:

$$v = \frac{V}{m} \text{ 或 } V = m \cdot v \quad (1-3)$$

式中,  $v$  为比体积;  $V$  为体积,  $\text{m}^3$ ;  $m$  为质量,  $\text{kg}$ 。

由式(1-3)可知, 比体积  $v$  和密度  $\rho$  互成倒数, 因此不是相互独立的参数。

注: 工程热力学中通常用  $v$  作为独立参数。

### (4) 热力学能

热力学能是工质内部储存能, 热力学能包括内动能及内位能。热力学能用符号  $U$  表示, 我国法定的热力学能计量单位是焦耳 (J),  $1\text{kg}$  物质的热力学能称为比热力学能, 用符号  $u$  表示, 单位  $\text{J}/\text{kg}$ 。

### (5) 焓

工质在流经一个开口系统时, 进入 (或带出) 系统的能量除工质本身具有的热力学能, 工质还有在开口系统中流动而传递的推动功, 把这些工质流经一个开口系统时的能量总和叫做焓, 用大写字母  $H$  表示:

$$H = U + pV \quad (1-4)$$

在分析开口系统时, 因有工质流动, 热力学能  $U$  和推动功  $pV$  必同时出现, 在此特定情况下, 焓可以理解为由于工质流动而携带的, 并取决于热力状态参数的能量, 即热力学能与推动功之和。在分析闭口系统时, 焓的作用相对次要, 一般使用热力学能参数。然而, 在分析闭口系统经历定压变化时, 焓却有特殊的意义, 由热力学第一定律闭口系统能量方程:

$$Q_p = \Delta U + W = \Delta U + p\Delta V = \Delta(U + pV) = \Delta H \quad (1-5)$$

焓的变化等于闭口系统在定压过程中与外界交换的热量。

$1\text{kg}$  工质的焓称为比焓, 用小写字母  $h$  表示:  $h = u + pv$ , 焓的单位为焦耳 (J), 比焓的单位是  $\text{J}/\text{kg}$ 。

### (6) 熵

熵可以从热力学理论的数学分析中导出, 应用热力学第二定律可以证明, 在闭口、可逆条件下, 存在如下关系:

$$ds = \left( \frac{\delta q}{T} \right)_{\text{rev}} \quad (1-6)$$

式中,  $\delta q_{\text{rev}}$  为  $1\text{kg}$  工质在微元可逆过程中与热源交换的热量;  $T$  为传热时工质的热力学温度;  $ds$  为此微元过程中  $1\text{kg}$  工质的熵变, 也称比熵变。

熵的单位是  $\text{J}/\text{K}$ ,  $1\text{kg}$  工质的熵称为比熵, 用小写字母  $s$  表示, 比熵的单位是  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

## 2. 示功图和温熵图

系统内工质状态的连续变化过程称为热力过程。在实际的热力过程中, 要想完成热功转换, 工质的状态参数必然发生变化, 因此, 实际热力过程中的工质并不处于平衡状态。准平衡过程指状态变化过程中每个中间状态都是平衡状态的过程。准平衡过程实际上是一种理想的过程, 但工程上的大多数过程, 由于热力系统平衡的速度很快, 仍可作为准平衡过程进行分析。系统经历了一个热力过程之后, 如果可沿原过程逆向进行, 并使系统和外界都回到初

态而不留下任何影响, 则称系统原先经历的过程叫可逆过程。可逆过程是一种无耗散的准平衡过程。

### (1) 示功图

在热力学中, 功的定义为: 功是热力系统通过边界而传递的能量。

沿用力学中对功的数学表达式:

$$\delta W = f \cdot dx \text{ 或 } W_{1-2} = \int_1^2 F dx$$

约定: 系统对外界做功为正, 而外界对系统做功为负。

功的法定计量单位为焦耳, 用符号表示为 J,  $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ 。

单位质量的物质所做的功称为比功, 单位为 J/kg, 且  $w = \frac{W}{m}$ 。

单位时间内完成的功为功率, 单位 W (瓦),  $1\text{W} = 1\text{J/s}$ , 工程中常用 kW 作为功率的单位。

如图 1-3 所示,  $m\text{kg}$  工质吸热膨胀, 假设该过程为可逆过程, 则工质的状态变化是连续的, 从状态 1 到状态 2 中的每一个中间过程状态均为平衡状态, 且不发生能量耗散, 那么气体吸收的热量, 除了使气体内部分子运动加剧外, 其余全部转变成机械功。由于过程是可逆的, 所以工质加在活塞上的力  $F$  和外界施加在活塞上的力只差一个微小量, 按照上面对功的定义, 工质膨胀移动了  $dx$  距离时反抗外力所做的功为:

$$\delta W = F dx = pA dx = p dV \quad (1-7)$$

则从状态 1 到状态 2, 工质所做功总和为:

$$W_{1-2} = \int_1^2 p dV \quad (1-8)$$

这个积分从数值上讲, 等于面积 1—2—n—m—1 所围成的面积。即膨胀功  $W_{1-2}$  在  $p$ - $V$  图上可用过程线下方的面积 1—2—n—m—1 来表示, 因此  $p$ - $V$  图也叫示功图。

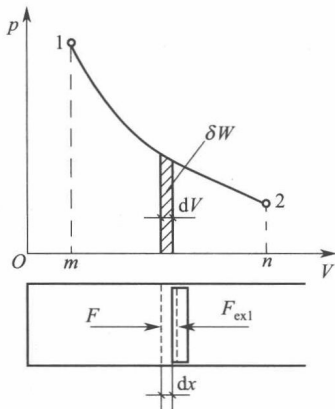


图 1-3 示功图

### (2) 温熵图

热力系统和外界之间仅由于温度不同而通过边界传递的能量叫做热量。热量的单位是焦耳 (J), 工程上常用千焦 (kJ) 来表示热量多少。

约定: 系统吸热, 热量为正; 反之热量为负。

热量用大写字母  $Q$  表示, 用小写字母  $q$  表示  $1\text{kg}$  工质所吸收的热量。

系统在可逆过程中与外界交换的热量可由计算式  $\delta q = T ds$

及  $q_{1-2} = \int_1^2 T ds$  表示, 另外可逆过程热量  $q_{1-2}$  在  $T$ - $s$  图上可用过程线下方的面积来表示, 如图 1-4 所示。

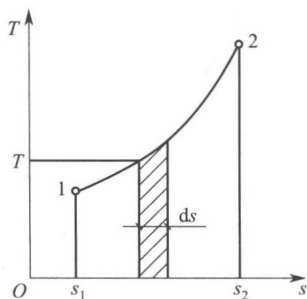


图 1-4 温熵图

## 3. 理想气体的基本热力过程

汽车发动机作为热机的一种, 需要通过工质的膨胀对外做功, 因此通常采用气态工质。理想气体是一种实际不存在的假想气体, 其两点假设为: 分子是些弹性的、不具体积的质点; 分子间相互没有作用力。

式(1-9)表示理想气体在任一平衡状态时  $p$ 、 $v$ 、 $T$  之间关

系的方程式, 叫做理想气体状态方程式, 或称克拉贝龙方程。

$$p\nu = R_g T \quad (1-9)$$

式中,  $R_g$ 称为气体常数, 它是一个只与气体种类有关, 而与气体所处状态无关的物理量。 $p$  的单位为 Pa;  $T$  的单位为 K;  $\nu$  的单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ ; 与此相应的  $R_g$  的单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

单位质量的物体温度升高 1K (或  $1^\circ\text{C}$ ) 所需的热量, 称为质量热容, 简称比热容, 即:

$$c = \frac{\delta q}{dT} \quad \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-10)$$

在大多数热力设备中, 工质往往是在接近压力不变或体积不变条件下吸热或放热的, 因此定压过程和定容过程的比热容最常用, 它们分别称为比定压热容 (也称质量定压热容) 和比定容热容 (也称质量定容热容), 用  $c_p$  和  $c_v$  表示, 二者的关系如式(1-11) 所示:

$$c_p - c_v = R_g \quad (1-11)$$

比值  $c_p/c_v$  称为比热容比, 或质量热容比, 以  $\gamma$  表示,  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_{p,m}}{C_{v,m}}$ , 则

$$c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R_g \quad c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R_g \quad (1-12)$$

工程上广泛应用的各种热工设备, 尽管它们的工作原理各不相同, 但都是为了完成某种特定的任务而进行的相应的热力过程。例如: 通过工质的吸热、膨胀、放热、压缩等一系列热力状态变化过程实现热能与机械能的相互转换, 用热力学观点来进行热力分析时, 这些热工设备, 可以无一例外的看作是一种具体的热力学模型。它们都包括系统、边界、外界三个基本组成部分; 具备“系统状态变化”、“系统与外界的相互作用”以及“两者之间的内在联系”这三个基本要素。

在热工设备中不可避免地存在摩擦、温差传热等等不可逆因素, 若工质各个状态参数都在变化, 则不易确定其变化规律。仔细观察发现, 某些常见过程却又往往近似具有某一简单的特征。例如: 汽油机气缸中工质的燃烧加热过程, 由于燃烧速度很快, 压力急剧上升而体积不变, 接近定容; 活塞式压气机中, 若气缸套的冷却效果非常理想, 压缩过程中气体的温度几乎不升高, 近似定温。工程热力学将热力设备中的各种过程近似地概括为几种典型过程, 即定容、定压、定温和绝热过程。同时, 为使问题简化, 暂不考虑实际过程中不可逆的耗损而作为可逆过程。这四种典型的可逆过程称为基本热力过程, 可用简单的热力学方法予以分析计算。随后, 考虑到不可逆耗损, 再借助一些经验系数进行修正。由此可对热力设备或系统的性能、效率作出合理的评价, 同时, 计算结果与实际情况在量上也相当接近。可以认为, 工质基本热力过程的分析 and 计算是热力设备设计计算的基础和依据。

### (1) 定容过程

比容保持不变的过程称为定容过程。根据定容过程的特征, 其过程方程为:  $\nu = \text{定值}$ 。根据定容过程的过程方程式  $\nu = \text{定值}$ , 以及理想气体状态方程,  $p\nu = R_g T$ , 即可得出定容过程中的参数关系:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p}{T} = \frac{p_2}{T_2} = \frac{R_g}{\nu} = \text{定值} \quad (1-13)$$

式(1-13) 说明: 在定容过程中气体的压力与温度成正比。例如, 定容吸热时, 气体的温度及压力均升高; 定容放热时, 两者均下降。

如图 1-5 所示, 定容线在  $p-\nu$  图上是一条与横坐标  $\nu$  轴相垂直的直线, 若以 1 表示初

态, 则  $1-2v$  表示定容放热;  $1-2v'$  表示定容吸热, 它们是两个过程。

在  $T-s$  图上, 定容线是一条指数曲线, 其斜率随温度升高而增大, 即曲线随温度升高而变陡, 在右图中  $1-2v$  表示定容放热;  $1-2v'$  表示定容吸热, 它们是与  $p-v$  图上同名过程相对应的两个过程, 过程线下面面积代表所交换的热量。

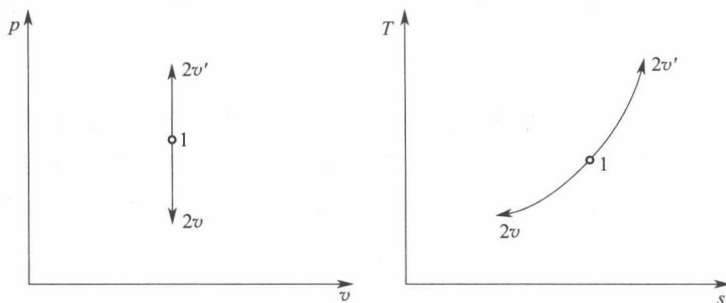


图 1-5 定容过程的  $p-v$  图和  $T-s$  图

### (2) 定压过程

压力保持不变的过程称为定压过程。根据定压过程的特征, 其过程方程为:  $p = \text{定值}$ 。定压过程的参数关系:

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v}{T} = \frac{v_2}{T_2} = \frac{R_g}{p} = \text{定值} \quad (1-14)$$

式(1-14)说明在定压过程中气体的比容与温度成正比。因此, 定压加热过程中气体温度升高必为膨胀过程; 定压压缩过程中气体比容减小必为温度下降的放热过程。

如图 1-6 所示, 在  $T-s$  图上, 定压线也是一条指数曲线, 但因  $c_p > c_v$ , 所以通过同一状态的定压线总比定容线平坦。为比较方便, 在上图中同时画出了通过同一初态的定压线及定容线, 其中,  $1-2p$  表示定压吸热过程;  $1-2p'$  表示定压放热过程, 它们是与  $p-v$  图上同名过程相对应的两个过程, 过程线下面面积代表所交换的热量。

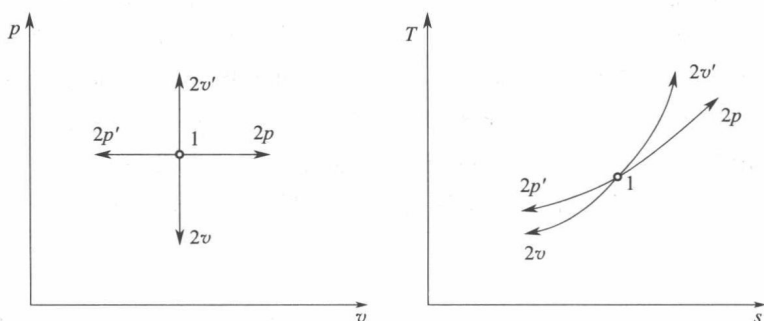


图 1-6 定压过程的  $p-v$  图和  $T-s$  图

### (3) 定温过程

温度保持不变的状态变化过程称为定温过程。定温过程方程:  $T = \text{定值}$ 。定温过程的参数关系:

$$p_1 v_1 = p v = p_2 v_2 = R_g T = \text{定值} \quad (1-15)$$

即定温过程中压力与比容成反比。

如图 1-7 所示, 在  $p-v$  图上定温过程是一条等边双曲线, 过程线的斜率为负值, 其中  $1-2T$  是等温膨胀过程,  $1-2T'$  是等温压缩过程。定温过程在  $T-s$  图上是一条与纵坐标  $T$  轴相垂直的水平直线, 其中  $1-2T$  及  $1-2T'$  是与  $p-v$  图上同名过程线相对应的两个过程, 过程线  $1-2T$  下面的面积为正, 表示吸热,  $1-2T'$  下面的面积为负, 表示放热。

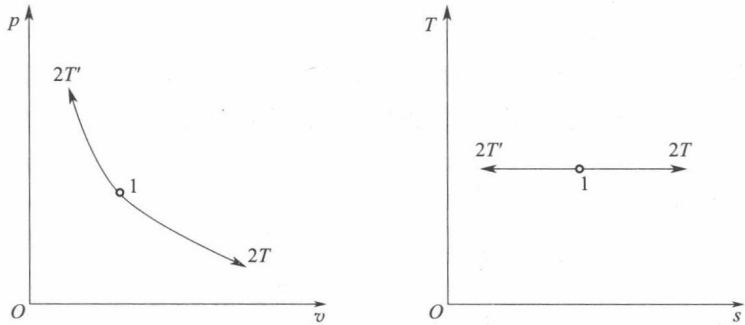


图 1-7 定温过程的  $p-v$  图和  $T-s$  图

#### (4) 绝热过程

绝热过程是状态变化的任何一微元过程中系统与外界都不交换热量的过程, 即过程中每一时刻均有:  $\delta q = 0$

当然, 全部过程与外界交换的热量也为零, 即:  $q = 0$ 。

已经证明, 在闭口可逆条件下:  $ds = \left(\frac{\delta q}{T}\right)_{\text{rev}}$ 。

显然, 在闭口可逆绝热条件下有  $ds = 0$ 。根据闭口系统与开口系统之间的内在联系, 可以得出这样的结论, 即在开口系统稳定可逆绝热条件下有  $ds = 0$ 。总而言之, 可逆绝热是保持比熵不变的充分条件。

值得指出, 可逆绝热过程一定是定熵过程, 但定熵过程不一定是可逆绝热过程。不可逆的绝热过程不是定熵过程, 定熵过程与绝热过程是两个不同的概念。

对于理想气体, 定熵指数  $\kappa$  等于比热容比  $\gamma$ , 即:  $\kappa = \gamma$ , 因此的定熵过程方程式:

$$pv^\kappa = \text{定值} \quad (1-16)$$

如图 1-8 所示, 定熵线比定温线陡, 它们的斜率都是负的,  $1-2s$  表示可逆绝热膨胀过程,  $1-2s'$  是定熵压缩过程。 $T-s$  图上定熵是一条与横坐标  $s$  轴相垂直的直线,  $1-2s$  及  $1-2s'$  分别表示与  $p-v$  图上同名过程线相对应的两个过程, 过程线下面的面积均为零, 表示没有热量交换。

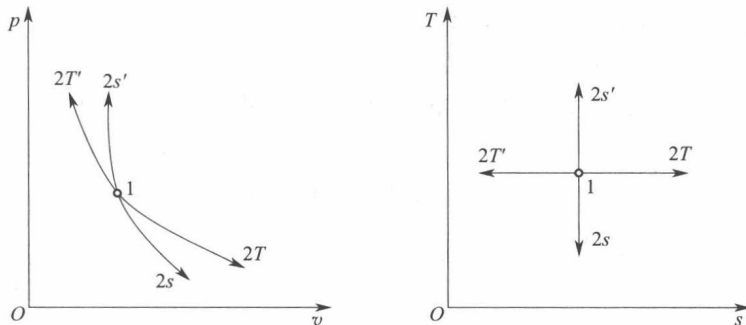


图 1-8 绝热过程的  $p-v$  图  $T-s$  图



## 1.1.2 热力循环与热效率

### 1. 定义

热力循环工质由某一初态出发, 经历一系列热力状态变化后, 又回到原来初态的封闭热力过程称为热力循环, 简称循环。

循环按性质分为可逆循环和不可逆循环。按循环效果及进行方向分为正向循环和逆向循环。其中, 正向循环是指热能转换为机械能的热力循环, 而逆向循环是指机械能转换热能的热力循环。

通常用经济性指标来表示热力循环的效率。

$$\text{经济性指标} = \frac{\text{得到的收获}}{\text{花费的代价}} \quad (1-17)$$

正向循环也叫动力循环, 如图 1-9 所示。以 1kg 工质在封闭气缸内进行一个任意的可逆正向循环, 图(a)、(b) 分别为该循环的  $p-v$  及  $T-s$  图。

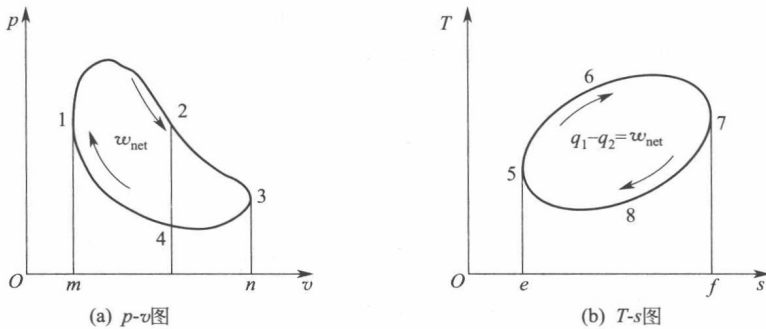


图 1-9 正向循环

图(a) 中 1—2—3 为膨胀过程, 过程功为面积 1—2—3—n—m—1, 3—4—1 为压缩过程, 该过程消耗的功为 3—4—1—m—n—3, 工质完成一个循环后对外做的净功称为循环功, 以  $w_{\text{net}}$  表示。 $w_{\text{net}} = \text{膨胀功} - \text{压缩消耗功}$ , 其值为图中循环曲线所包围的面积, 1—2—3—4—1。根据以前约定: 工质膨胀做功为正, 压缩做功为负, 因此净功  $w_{\text{net}}$  就是工质沿一个循环过程所做功的代数和, 数学表达式为:  $w_{\text{net}} = \oint \delta w$ 。

为使工质所做净功为正, 可采取以下方法: 使工质在膨胀过程开始前, 或膨胀过程中, 与高温热源接触, 从中吸入热量; 而在压缩过程开始前或过程中, 工质与低温热源接触, 放出热量。这样就保证了在相同体积时膨胀过程的温度较压缩过程的高, 使膨胀过程压力比压缩过程高, 做到膨胀过程线高于压缩过程线, 例如图(a) 中,  $v_2 = v_4$ , 而  $p_2 > p_4$ 。现在使用的热工设备多采用上述原理。

图(b) 中, 5—6—7 是工质从热源吸热, 热量为面积 5—6—7—f—e—5, 用  $q_1$  表示; 7—8—5 是放热过程, 热量为面积 7—8—5—e—f—7, 用  $q_2$  表示。循环过程中, 工质与热源 (高温热源) 及冷源 (低温热源) 所交换热量的代数和为:  $q_{\text{net}} = q_1 - q_2 = \oint \delta q$ 。

正向循环在  $p-v$  图及  $T-s$  图上都是按顺时针方向进行的。

正向循环的经济性用热效率  $\eta_t$  来衡量, 正向循环的收益是  $w_{\text{net}}$ , 花费的代价为工质吸收的热量  $q_1$ , 故  $\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1}$ 。 $\eta_t$  越大, 表明吸入同样热量  $q_1$  时得到的循环功  $w_{\text{net}}$  越多, 热机