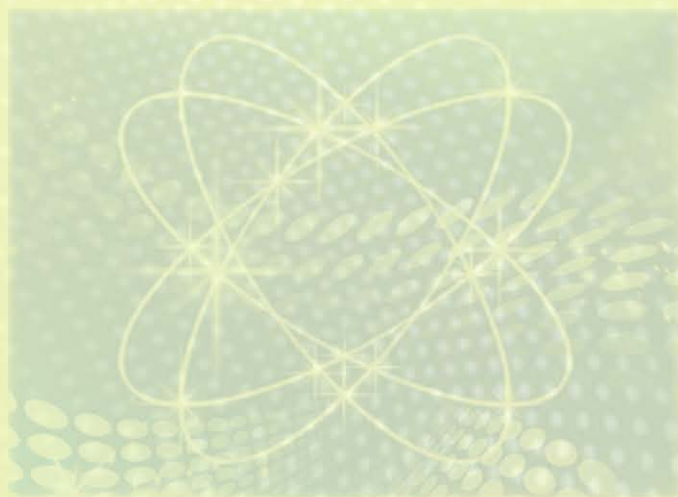


二十一世纪职业教育规划教材

# 汽车发动机原理

主编 徐衡 曾虎



江西高校出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理/徐衡,曾虎主编. —南昌:江西高校出版社, 2010. 12

二十一世纪职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5493 - 0143 - 0

I. ①汽... II. ①徐... ②曾... III. ①汽车 - 发动机 - 理论 - 职业教育 - 教材 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 234694 号

出版发行	江西高校出版社
社 址	江西省南昌市洪都北大道 96 号
邮 政 编 码	330046
总编室电话	(0791) 8504319
销 售 电 话	(0791) 8511423
网 址	www. juacp. com
印 刷	北京市德美印刷厂
照 排	江西龙莹印务有限公司
经 销	各地新华书店
开 本	787mm × 1092mm 1/16
印 张	13.5
字 数	337 千字
版 次	2010 年 12 月第 1 版第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5493 - 0143 - 0
定 价	24.00 元

赣版权登字 - 07 - 2010 - 225

版权所有 侵权必究

# 前言

## FOREWORD

本书是为汽车维修与检测和汽车运用工程等专业编写的职业教育通用教材。在编写本书过程中,笔者充分考虑了目前职业教育的教学特色和学生特点,内容上尽量压缩理论性分析和公式推导,注重理论与实践相结合,并突出针对性、先进性和实践性,并适当介绍了实用性较强且最新的汽车新技术知识。编者建议在教学过程中,加强各章节中理论与实践教学的结合,基于此重点使学生掌握发动机原理与汽车理论的基本知识,达到更深入地理解发动机技术在汽车应用的目的。

本书由九个章节组成,它们分别是:工程热力学基础、发动机的性能指标、发动机的换气过程、燃料与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、发动机特性、发动机增压、发动机排放与噪声控制。为了帮助学生更加深刻理解教材内容,在编排上,每个章节不仅有小结、练习与思考题,还在部分章节上增加了实践教学环节,既增强学生的感性认识,又可以加强教学效果。

本书由江西蓝天学院徐衡、江西机电职业技术学院曾虎任主编,江西现代职业技术学院高加泉、江西应用技术职业学院李良、江西蓝天学院樊富起任副主编,编写人员有江西蓝天学院的姜锟、李如贤、赵新树。全书由江西蓝天学院的南长根负责本书的编写大纲、统稿和审读。

在教材编写中,编者参考了大量资料,并引用了部分资料,对资料原作者在此表示衷心感谢。

由于时间紧迫和编者水平所限,书中难免存在不足或疏漏之处,欢迎批评指正。

编者

2010-07-07



# 目录

## CONTENTS



第一章 工程热力学基础 .....	1
【理论教学】	
1.1 工程热力学基本概念 .....	1
1.2 热力学第一定律 .....	6
1.3 理想气体的热力过程 .....	11
1.4 热力学第二定律 .....	20
小结 .....	23
练习与思考题 .....	24
第二章 发动机的性能指标 .....	25
【理论教学】	
2.1 汽车发动机实际热力循环和热平衡 .....	25
2.2 发动机性能指标体系 .....	27
2.3 发动机机械效率 .....	34
【实践教学】	
2.4 发动机机械效率的测定 .....	36
小结 .....	38
练习与思考题 .....	39
第三章 发动机的换气过程 .....	40

	<b>【理论教学】</b>	
	3.1 四冲程发动机的换气过程 .....	41
	3.2 换气过程的性能指标 .....	45
	3.3 影响充量系数的因素 .....	47
	3.4 提高充量系数的措施 .....	49
	<b>【实践教学】</b>	
	3.5 配气相位的检测 .....	52
	3.6 配气相位的调整 .....	57
	小结 .....	58
	练习与思考题 .....	58
<b>第四章</b>	<b>燃料与燃烧</b> .....	<b>59</b>
	<b>【理论教学】</b>	
	4.1 发动机的燃料及其使用特性 .....	59
	4.2 燃烧热化学 .....	61
	4.3 燃烧的基本知识 .....	66
	4.4 替代燃料问题 .....	69
	<b>【实践教学】</b>	
	4.5 气门间隙的检查与调整及气缸压缩压力的测量 .....	75
	小结 .....	77
	练习与思考题 .....	77
<b>第五章</b>	<b>汽油机混合气的形成与燃烧</b> .....	<b>78</b>
	<b>【理论教学】</b>	
	5.1 汽油的使用性能 .....	78
	5.2 汽油机燃烧过程 .....	83
	5.3 汽油混合气的形成 .....	90
	5.4 汽油机燃烧室 .....	98
	<b>【实践教学】</b>	
	5.5 电动汽油泵检测 .....	103
	小结 .....	104
	练习与思考题 .....	105



<b>第六章</b>	<b>柴油机混合气的形成与燃烧</b>	106
	<b>【理论教学】</b>	
	6.1 燃烧与放热	106
	6.2 燃油喷射与雾化	114
	6.3 混合气的形成和燃烧室	119
	6.4 燃烧过程的影响因素	128
	<b>【实践教学】</b>	
	6.5 喷油泵与调速器的检查与调试	135
	小结	136
	练习与思考题	137
<b>第七章</b>	<b>发动机特性</b>	139
	<b>【理论教学】</b>	
	7.1 发动机工况	139
	7.2 发动机的负荷特性	141
	7.3 发动机的速度特性	144
	7.4 万有特性	150
	<b>【实践教学】</b>	
	7.5 发动机台架试验	152
	小结	157
	练习与思考题	158
<b>第八章</b>	<b>发动机增压</b>	159
	<b>【理论教学】</b>	
	8.1 发动机增压概念	159
	8.2 柴油机的废气涡轮增压	163
	8.3 车用发动机增压的问题	171
	小结	176
	练习与思考题	177
<b>第九章</b>	<b>发动机排放与噪声控制</b>	178
	<b>【理论教学】</b>	
	9.1 发动机有害排放物的生成及危害	178

9.2 影响汽油机有害排放物生成的主要因素及控制 .....	183
9.3 影响柴油机有害排放物生成的主要因素 .....	191
9.4 发动机排放标准与测试 .....	197
9.5 发动机噪声来源与控制 .....	202
<b>【实践教学】</b>	
9.6 烟度的测量 .....	205
9.7 噪声的测试 .....	206
小结 .....	206
练习与思考题 .....	206
<b>参考文献</b> .....	207



# 第一章

## 工程热力学基础



### 【学习目的与要求】

掌握汽车发动机热力学的基本概念。  
了解传热学的基本概念和逆循环。  
掌握热力学第一定律和第二定律。  
理解理想气体状态方程和多变过程方程。  
了解混合气体的比热、热力学性质。

### 【学习重点】

热力系统、热力过程及热力状态的基本概念,热力学第一定律。  
多变过程方程。  
燃烧基本知识。  
热效率的计算及影响因素。

### 【学习难点】

热力过程方程,功、能、热的异同点。  
卡诺循环与卡诺定理。

### 【理论教学】



## 1.1 工程热力学基本概念

工程热力学是热力学的一个分支,它研究热能和机械能相互转换(即热功转换)的过程及其规律,并着重研究这些规律在热力设备上的应用。

本章就学习内燃机原理所必需的热力学基本知识作一扼要的叙述,从而为学习内燃机原理提供必要的理论基础和计算方法。

### 1.1.1 工质、热源和热力系统

工程热力学不深入研究各种热力设备的具体构造和工作特性,它只着重分析存在于热力设备中的共同性问题。例如,在活塞式内燃机中,是通过燃料与空气相混合在气缸内燃烧而获得高温高压的燃气,燃气再推动活塞带动曲轴旋转而对外做功,最后废气排入大气中。蒸汽动力装置却是使水从燃气中吸收热量而获得高温高压的水蒸气,用水蒸气推动蒸汽机的活塞或蒸汽轮机叶轮而对外做功,最后废蒸气被排入大气或冷凝器中凝结;其他热机的工作方式也都不尽相同。但是概括起来,这些热力设备总是用一种工作物质从某一能源中获





取热能后,使它具有高能而对机器做功,最后又把余下的热能排入大气或冷却水中。这个过程是任何热动力设备共性的、本质的过程。

通常,我们把实现热能和机械能之间相互转化的工作物质叫做工质,把供给工质热量的高温物质叫做热源(或高温热源),把吸收工质放出热量的冷却介质或环境叫做冷源(或低温热源)。这样,任何热动力设备的工作就被概括为:工质从热源吸收热能,将其中一部分转化为机械能而做功,并把余下的一部分传给冷源。

为分析问题方便起见,和力学中取分离体一样,热力学中常把分析的对象从周围物体中分割出来,研究它通过分界面与周围物体之间的热能和机械能的传递。这些作为研究对象的物体总称为热力系统,而把热力系统外面和热功转换过程有关的其他物体总称为外界。系统和外界之间的分界面可以是实际存在的,也可以是假想的,通常,我们都称之为边界。

热力系统可以分为闭口系统和开口系统。若一个热力系统和外界之间只可能有热量和机械功等能量交换而无物质交换,这种系统就称为闭口系统,如图 1-1 所示。若一个热力系统和外界间既有热量和机械功等能量交换,同时又有物质的交换,这种系统就称为开口系统,如图 1-2 所示。

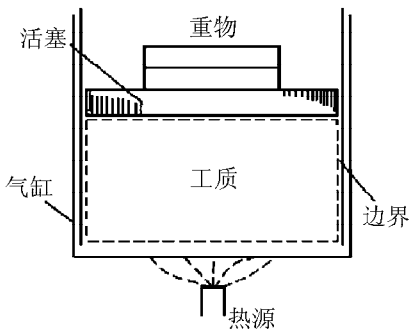


图 1-1 闭口系统

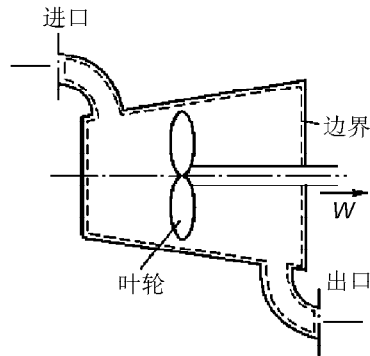


图 1-2 开口系统

在热力学中还常使用绝热系统和孤立系统这两个重要概念。绝热系统是指和外界没有热量传递的热力系统,孤立系统是指和外界没有任何形式的能量传递(主要指热量和功)的热力系统。显然,绝对来说,这两种系统是不存在的。它们只是一些实际过程忽略不计某些因素的理想模型。

### 1.1.2 状态与状态参数

状态,是在某一定瞬间,用以表示物质物理特性的总标志。用来描述物质的状态特征的物理量就是状态参数。

从物理性质上看,由于气体便于流动、压缩和膨胀,因此,在热力设备中往往都使用气体作为工质。在热力学中常用的气体状态参数共有六个,即温度( $T$ )、压力( $P$ )、比体积( $V$ )、热力学能( $U$ )、焓( $H$ )和熵( $S$ )。其中可以直接测量的 $P$ 、 $V$ 、 $T$ 称为基本状态参数。实际上,气体的状态只要用两个彼此独立的参数就可以确定,其他的状态参数可以表示为这两个参数的函数。



### 1. 温度 $T$

温度表示物体的冷热程度。分子运动学说认为,气体的温度与分子运动的平均移动动能成正比。

在法定计量单位中,温度的单位为开尔文,代号为 K。它选取水的固相、液相、气相三相平衡状态下的温度,作为定义热力学温标的单一固定点,并规定水的三相点温度为 273.16K,而热力学温标中温度单位开尔文为二相点温度的  $1/273.16$ 。

为了使用上方便,在法定计量单位中也规定了一种实用温标,即摄氏温标,符号为  $t$ ,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。两种温标起点不同,它们两者间的关系为

$$t = T - T_0 \quad (1-1)$$

式中,  $T_0 = 273.15\text{K}$ ,为冰点的热力学温度。

### 2. 压力 $P$

单位面积上受到的垂直作用力称为压力,分子运动学说认为,气体对容器壁的压力是气体分子撞击容器壁的结果,它与分子浓度及分子平均移动动能成正比。

在法定计量单位中,压力的单位是帕斯卡(Pa),因工程应用中 Pa 单位太小,有时以  $10^6\text{Pa}$  和  $10^3\text{Pa}$  作单位,称为兆帕(MPa)和千帕(kPa)。

流体的压力用压力计测量,工程上常应用的压力计有弹簧管式和 U 形管式两类。压力计测得的压力为绝对压力与当地大气压力之差,称为表压力。

### 3. 比体积 $V$

单位质量的气体所占的容积称为气体的比体积,用符号  $v$  表示。在法定计量单位中体积的单位是  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。如气体的质量为  $m\text{kg}$ ,容积为  $V\text{m}^3$ ,则

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-2)$$

比体积的倒数称为密度,用  $\rho$  表示。在法定计量单位中,密度的单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

密度和比体积反映了气体分子聚集疏密的程度。

### 4. 热力学能 $U$

在工程热力学中,气体的内热能称为热力学能或内能,它包括气体的内动能和内位能。

根据分子运动学说的理论,分子在不断地作不规则的平移运动,其动能可由温度来反映,如果是多原子分子,则分子还有旋转运动和振动,这些能量也是与温度有关的。此外,由于分子间作用力的存在,分子还具有能量的大小决定于分子间的平均距离,即决定于比体积。因此,热力学能是温度和比体积的函数。

热力学能用符号  $U$  表示,单位为焦耳(J)。1kg 气体具有的热力学能用符号  $u$  表示,叫做比热力学能,单位为 J/kg,即

$$u = \frac{U}{m} \quad (1-3)$$

### 5. 焓 $H$

设有 1kg 状态为  $P_1, v_1, u_1$  的工质从大气中进入气缸,如图 1-3。此时以压力  $p_1$  推动活塞占有等于气缸容积而做的功,其值为  $p_1 v_1$ 。此时工质的状态没有变化,其热力学能仍为  $u_1$ 。对这个系统(气缸)来说,由于进入 1kg 而带进系统的总能量,则为  $u_1 + p_1 v_1$ 。我们把这



一能量称为比焓  $h_1$ 。同样,当  $1\text{kg}$  工质在状态  $p_2, v_2, u_2$  下离开气缸时,它带走的总能量为比焓  $h_2 = u_2 + p_2 v_2$ , 即有

$$h = u + pv \quad (1-4a)$$

对于  $m\text{kg}$

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

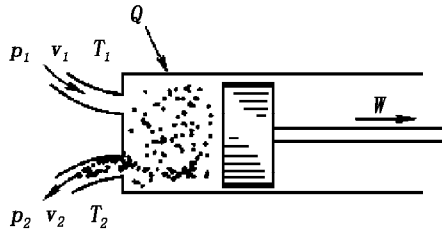


图 1-3 工质焓的示意图

其中,  $H$  叫做焓, 它的单位是焦耳(J)。比焓  $h$  的单位是  $\text{J}/\text{kg}$ 。根据它们的定义式, 即:

$$h = \frac{H}{m} \quad (1-5)$$

比焓  $h$  是  $1\text{kg}$  的热力学能  $u$  和在流动时由机械移动而携带的功  $pv$  的总和, 其中  $pv$  又称为流动功或推进功。既然  $p, v, u$  都是工质状态的状态参数, 由它们所决定的  $h$  也是工质状态的状态参数。

## 6. 熵 S

在可逆过程(见下文)中, 熵的增量等于在过程中所接受的热量除以的温度所得到的熵。

熵用符号  $S$  表示, 单位是  $\text{J}/\text{K}$ 。  $1\text{kg}$  所具有的熵用符号  $s$  表示, 叫做比熵, 单位为  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ , 因此有:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-6a)$$

及

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-6b)$$

其中,  $Q$  表示过程中吸收的热量,  $q$  表示过程中每  $\text{kg}$  吸收的热量。

### 1.1.3 可逆过程与不可逆过程

#### 1. 平衡状态与准静态过程

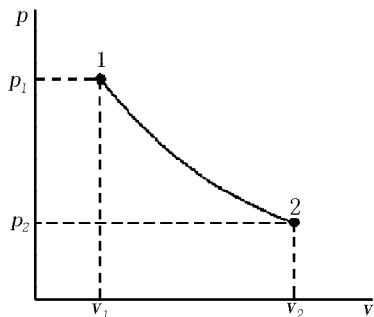
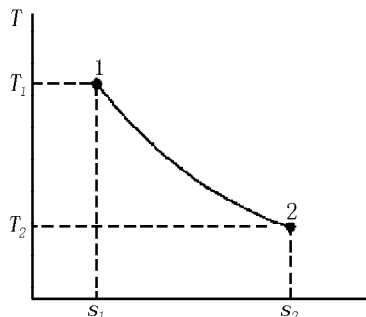
热力系统的平衡状态, 是指系统内各部分的温度、压力等都相同时的状态。显然, 它应包括热的平衡与力的平衡两个方面。

由于独立的状态参数只有两个, 因而可以利用任意两个独立状态参数组成二维平面坐标系。坐标图上任一点就代表了气体的某一确定的平衡状态。通常用的最多的是  $p-v$  图(图 1-4) 和  $T-s$  图(图 1-5)。由于系统处于平衡状态时, 系统内各处温度和压力都相等, 即它有确定的状态参数, 所以只有平衡状态才能在坐标图上表示。

系统由一个状态变到另一个状态叫做系统经历了一个过程。例如, 热力机械中的压缩、



膨胀等都是一个过程。在实际的设备中所经历的过程都是很复杂的。由于一切过程都是平衡被破坏的结果,即只有系统与外界有了力或热的不平衡之后,才能促使系统向新的状态变化,因此,实际的过程都是不平衡的。但是某些情况下,系统在平衡被破坏之后能自动回复到平衡状态,而且回复所需的时间又很短,如果过程进行得很缓慢,过程经历的时间与回复的时间比较起来相当大,则可以认为每一个中间状态,系统都来得及在全部容积中建立起同一温度和同一压力,即每一个中间状态都是平衡状态。这样的过程叫做准静态过程。

图 1-4  $p-v$  图图 1-5  $T-s$  图

实现准静态过程的条件是系统和外界不断存在热的平衡和力的平衡以及过程进行的无限慢。它是实际过程的理想化模型,是实际过程进行的非常缓慢时的一个极限。实际过程都不是绝对平衡的。但是在适当的条件下,许多过程都可以近似地作为准静态过程研究。

在准静态过程中,所经历的每一个状态都是平衡状态,而任一平衡状态都可用  $p-v$  图、 $T-s$  图上的一个点来表示,因此一个准静态过程就可用  $p-v$  图、 $T-s$  图中的一条连续曲线来表示,如图 1-4、1-5 中曲线 1-2。不是准静态过程不能用连续曲线表示,也不能用热力学方法分析。

## 2. 可逆过程和不可逆过程

当完成某一个过程之后,如果有可能使沿相同的路径逆向进行,并使整个系统和外界全部回复原来状态而不留下任何改变,这一过程就叫做可逆过程。如果没有这种可能,就叫做不可逆过程。

需要强调的是,不可逆过程并不是说不可能回复到原来状态,而是说整个系统和外界不能全部回复到原来状态。

非准静态过程一定是不可逆的,只有没有摩擦的准静态过程才是可逆的。换言之,可逆过程就是没有摩擦的准静态过程。准静态过程是针对内部过程的性质而言的,而可逆过程则更加充分地考虑了系统和外界的全部效果。当讨论的对象不仅仅局限于此时,用可逆这一概念更恰当一些。确切地说,只有可逆过程才能在坐标图上表示。

### 1.1.4 理想气体及状态方程式

#### 1. 理想气体和实际气体

实际的气体,分子总是占据一定的容积,而分子间总是存在着作用力的。在研究气体性质时,如果考虑分子间的作用力和分子占据的容积,问题就比较复杂。因此在热力学中,对气体作了两点假设:①气体分子是些弹性的、本身不具有体积的质点;②气体分子之间不存



在相互作用力。在这两点假设条件下,分子运动规律就大大简化,并能用简单的数学表达式来描述。这种气体就称为理想气体。

自然界中的实际气体,一般来讲,压力越低,温度越高,它的性质越接近于理想气体。对于氧气、氮气、氢气、空气等气体,常温常压下一般都可作为理想气体处理。而对于一些离液态不远的气体如水蒸气等,则要根据具体情况进行具体分析。

## 2. 理想气体状态方程式

理想气体状态方程式反映了理想气体在平衡状态下,三个基本参数( $P$ 、 $V$ 、 $T$ )之间的关系。它可以由几个实验定律推导得出,也可以根据分子运动学说直接得出。理想气体状态方程式为:

$$\text{对 } 1\text{kg 工质} \quad pv = R_g T \quad (1-7a)$$

$$\text{对 } m\text{kg 工质} \quad PV = mR_g T \quad (1-7b)$$

式中, $R_g$  为气体常数,单位为  $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ,它仅和气体种类有关,而与气体的状态无关。对任何一种气体, $R_g$  为确定值,可由下式计算得出:

$$R_g = \frac{R}{M} \quad (1-7c)$$

式中, $M$  为气体的千摩尔质量, $\text{kg}/\text{kmol}$ ;  $R$  为通用气体常数,亦称为摩尔气体常数,其数值为  $R = 8314.3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

理想气体状态方程式建立在平衡状态下,三个基本状态参数间的关系式。它的主要用途是可以根据任意两个已知的状态参数求第三个状态参数,或根据已知的三个状态参数求气体的质量。



## 1.2 热力学第一定律

### 1.2.1 热量和功

热力学中,热力系统和外界间的能量传递可以由两种方式来实现,一种传递方式是做功,一种传递方式是传热。

借做功来传递能量时,总是和物体的宏观位移相联系。例如气缸中的工质膨胀对活塞做功,只有通过工质和活塞分界面的宏观位移才能实现。活塞的移动停止了,做功也就结束了。做功的结果是使工质的一部分能量传递给了活塞。在这个过程中传递能量的多少用作了多少功来度量。

借传热来传递能量时就不需要有物体的宏观移动。如一个热源与工质接触就把能量直接传给了工质。它是通过接触面上两个物体中杂乱运动的质点间相互碰撞实现能量传递的。传热的结果是高温物体把一部分能量传递给了低温物体。在这个过程中传递能量的多少用放出或吸收了多少热量来度量。

由此可见,热量和功都是能量传递的度量,它们是过程量。只有在能量传递过程中才能有热量和功,没有过程,也就根本不存在热量和功。

功和热量通常分别用符号  $W$  和  $Q$  表示,在法定计量单位中,单位是焦耳(J)。每千克工





质做的功或传递的热量分别用符号  $w$  和  $q$  表示,单位是 J/kg。

假设工质在气缸内进行一个可逆的膨胀过程 1-2(图 1-6)。当活塞位移量为  $dx$  时,工质做功的膨胀功为  $dW$ ,则

$$dW = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dv$$

其中  $A$  是气缸的横截面积。

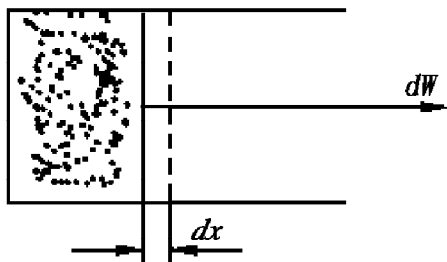


图 1-6 工质在气缸内的膨胀做功

在整个过程 1-2 中做功的膨胀功

$$W = \int_1^2 p dv$$

如果缸内工质为 1kg,上述两式为

$$dw = p dv \quad (1-8a)$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-8b)$$

如果过程反方向进行(压缩),则 1-1 过程中工质作的膨胀功

$$w = \int_2^1 p dv \quad \text{及} \quad W = \int_2^1 p dv$$

它是小于零的,故也叫压缩功,表示外界压缩工质做功。可见工质在可逆过程中所做功的大小,正好等于  $p-v$  图上曲线与横轴所包围的面积,如图 1-7 所示。

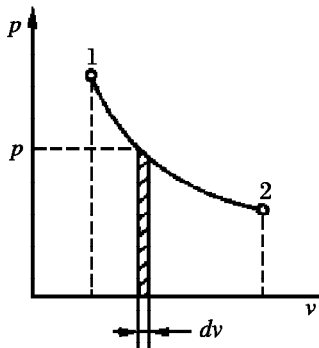


图 1-7 可逆过程中的膨胀功

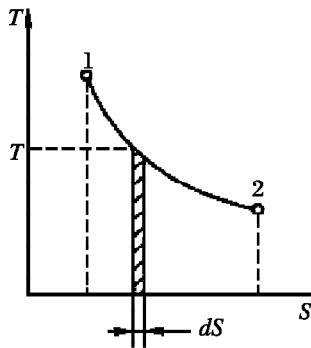


图 1-8 可逆过程中的热量

图 1-8 是上述过程在图上的标示。对做功过程  $ds$ ,根据熵的定义式有

$$dq = T ds \quad (1-9a)$$

则整个过程中,工质获得的热量

$$q = \int_1^2 T ds \quad (1-9b)$$



或

$$Q = \int_1^2 T ds \quad (1-9c)$$

过程按 1-1 方向进行时,

$$q = \int_2^1 T ds \quad \text{或} \quad Q = \int_2^1 T dS$$

因此时  $ds$  为负值,所以  $q$  亦为负值,表示此过程中工质对外放热。可见工质在可逆过程中所传递热量的大小正好等于  $T-s$  图下曲线与横轴所包围的面积。

对比式子

$$dw = p dv$$

$$dq = T ds$$

可以发现它们是相互对应的, $w$ 、 $q$  都是过程中传递的能量; $p$ 、 $T$  作为状态参数影响过程中能量传递的数量,而  $v$ 、 $s$  是否变化就代表了能量传递过程是否进行,也就是说  $dv$  和  $ds$  是能量传递的动力, $dv$  的正负代表了做功的正负,而  $ds$  的正负代表了传热的正负。

### 1.2.2 热力学第一定律

能量守恒及转换定律是自然界中最重要的普遍定律之一,它指出了自然界中物质所具有的能量,既不能创造也不能消灭,只能从一种能量形态转变为另一种形态,而且在转换的过程中两种能量在数量上相当。

热力学第一定律就是能量守恒和转换定律在热力学中的具体体现,它指出热能和其他形式的能量可以相互转化但总能量应该守恒。在工程热力学中,由于只研究热能和机械能之间的转化,因此热力学第一定律也可表述为:热和功可以相互转化,但系统热能与机械能的总和不变。

对于最一般的热力系统而言,系统与外界间既有功的交换,也有热的交换,同时系统的状态也在变化。也就是说,系统与外界间有能量的交换,系统本身也有能量的变化。因此把热力学第一定律应用于这个系统时,其能量关系可表示为:

$$E_1 + E_{in} - E_{out} = E_2 \quad (1-10)$$

式中, $E_1$  为系统的初始能量, $E_2$  为系统的最终能量, $E_{in}$  为传入系统的能量, $E_{out}$  为系统输出的能量。

下面,我们分闭口系统和开口系统两种情况来分别进行讨论:

#### 1. 闭口系统能量方程式

如图 [1-9(a)], 设过程开始时工质的状态参数为  $p_1$ 、 $V_1$ 、 $T_1$ , 此时工质具有的热力学能  $U_1$ , 即为系统的初始能量。在过程中系统从外界吸热  $Q$ , 同时工质因为膨胀, 推动活塞对外做功  $W$ , 最后状态参数变为  $p_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$ 。此时工质所具有的热力学能  $U_2$  即为系统的最终能量。根据式 1-10, 则有

$$U_1 + Q - W = U_2$$

$$Q = (U_2 - U_1) + W$$

$$\text{即} \quad Q = \Delta U + W \quad (1-11a)$$

$$\text{对于 kg 工质则可写为} \quad q = \Delta u + w \quad (1-11b)$$

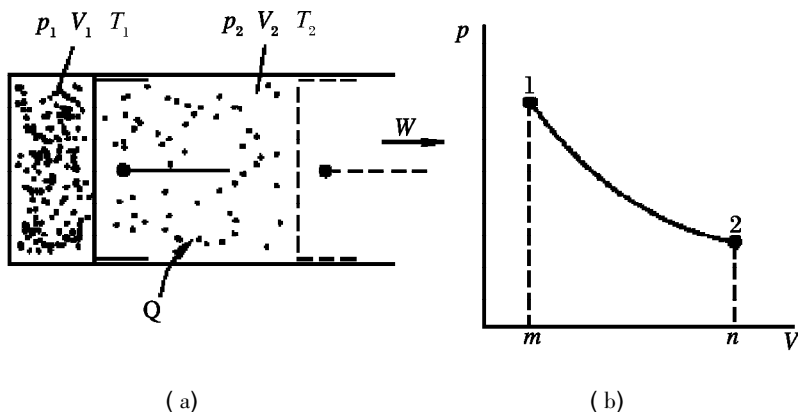


图 1-9 闭口系统能量平衡

对于一个微元过程,则有  $dq = du + dw$  (1-11c)

式(1-11)是热力学第一定律应用于闭口系统而得到的能量方程式,叫做热力学第一定律的第一解析式。它表明传给系统的全部能量一部分用于增加工质的热力学能,另一部分以做功的方式传给外界。

应该注意的是:式(1-11)中, $Q$ 、 $\Delta U$ 、 $W$ 都是代数值,它们都可以为正值或负值。系统吸热时,热量 $Q$ 为正;系统对外做功时,功 $W$ 为正;系统热力学能增加时,热力学能差 $\Delta U$ 为正,反之则为负。

式(1-11)是直接由能量守恒及转换定律导出的,因此它是普遍适用的。可用于任何工质、任何过程的计算。

当过程为一可逆过程时,可以在 $p-v$ 图上以一条连续曲线表示,如图1-9(b)。

此时,因有

$$dw = pdv \quad w = \int_1^2 pdv$$

所以有

$$q = \Delta u + \int_1^2 pdv \quad (1-12a)$$

$$Q = \Delta U + \int_1^2 pdv \quad (1-12b)$$

$$dq = du + pdv \quad (1-12c)$$

## 2. 开口系统能量方程式

如图1-10,设过程开始时系统内没有工质,其初始能量为零。1kg 状态参数为 $p_1$ 、 $v_1$ 、 $T_1$ 的工质,通过进口流入系统后,带给系统的能量应是其热力学能 $u_1$ 与流动 $p_1v_1$ 功之和,即焓 $h_1$ 。工质在系统内经过膨胀,状态参数变为 $p_2$ 、 $v_2$ 、 $T_2$ 。排出系统时带走的能量,也应为工质的焓 $h_2 = u_2 + p_2v_2$ ,在状态变化过程中,每kg工质从外界吸热 $q$ ,对外界做功 $w_s$ 。由于最后工质又排出了系统,因此系统的最终能量又为零。根据式(1-10),则有

$$Q + (h_1 + q) - (h_2 + w_s) = 0$$

即

$$q = (h_2 - h_1) + w_s$$



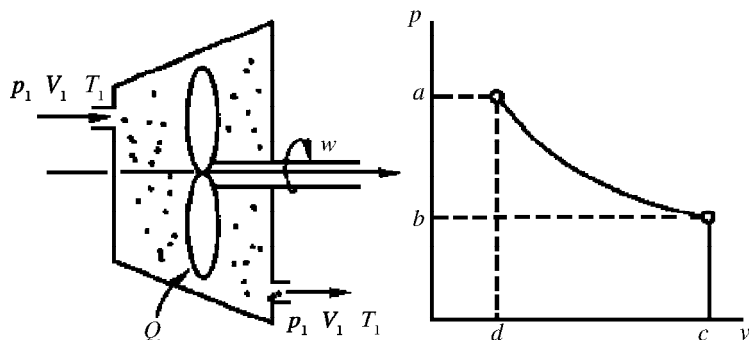


图 1-10 开口系统能量平衡

$$q = \Delta h + w_s \quad (1-13a)$$

对全部工质

$$Q = \Delta H + W_s \quad (1-13b)$$

此处的功  $W_s$  是系统实际输出的功,叫做轴功。

对于一个微元过程,则有

$$dq = dh + dw_s \quad (1-13c)$$

式(1-13)是热力学第一定律应用于开口系统的能量方程式,也叫做热力学第一定律第二解析式,它也是普遍适用的。式中的  $q$ 、 $\Delta h$ 、 $w_s$  也都可以为正值或负值。因为  $h_1 + u_1 = p_1 v_1$ ,  $h_2 = u_2 + p_2 v_2$ , 所以对于式(1-13a),有

$$w_s = q - (h_2 - h_1) = (q - \Delta u) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) = w + (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (1-14)$$

可见,在开口系统中,系统输出的轴功等于其膨胀功与流动净功之和。

当过程为一可逆过程时,其曲线如图 1-10b 所示,

$$w_s = \int_1^2 p dv + (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \int_1^2 p dv - \int_1^2 d(pv) = - \int_1^2 v dp \quad (1-15)$$

可见  $w_s$  的绝对值,可以用  $p-v$  图上该过程的曲线与纵轴所包围的面积来表示。所以对可逆过程有

$$q = \Delta h - \int_1^2 v dp \quad (1-16a)$$

$$Q = \Delta H - \int_1^2 v dp \quad (1-16b)$$

$$dq = dh - v dp \quad (1-16c)$$

### 3. 稳定流动能量方程式

对于更一般的情况,假设工质进入系统时,焓是  $h_1$ ,流速是  $c_1$ ,高度是  $z_1$ 。流出系统时,焓是  $h_2$ ,流速是  $c_2$ ,高度是  $z_2$ 。过程中每 kg 工质从外界吸热  $q$ ,对外作轴功  $w_s$ 。根据式(1-10),则有

$$q = (h_2 - h_1) + \left( \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) + w_s \quad (1-17)$$

该式称为稳定流动能量方程式,适用于稳定流动的情况,即各状态参数仅为空间位置的函数,不随时间而变。当气体的宏观动、位能有变化时,其能量关系应由式(1-17)计算。式(1-17)右边后三项之和称为技术功  $w_s$ ,属于机械能的范畴。

