



普通高等教育“十二五”汽车类规划教材

汽车发动机原理

◎ 阎春利 李长威 主编

◎ 孙凤英 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”汽车类规划教材

汽车发动机原理

主编 阎春利 李长威
主审 孙凤英



机械工业出版社

本书主要介绍了工程热力学基础、发动机循环与性能指标、发动机的换气过程、发动机的燃料与燃烧、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、废气涡轮增压技术、发动机排放污染与噪声等内容。

本书可作为本科汽车类各专业（交通运输、车辆工程、汽车服务工程等）的教材，也可作为从事交通运输及汽车设计与运用方面的工程技术人员、科研人员提供参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

汽车发动机原理/阎春利，李长威主编. —北京：机械工业出版社，2014.5

普通高等教育“十二五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-46160-9

I. ①汽… II. ①阎…②李… 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(2014)第050604号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：何士娟 责任编辑：何士娟

版式设计：赵颖喆 责任校对：申春香

封面设计：张静 责任印制：乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2014年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·296千字

标准书号：ISBN 978-7-111-46160-9

定价：29.90元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

目前,关于汽车发动机原理方面的教材很多,不同的教材也都有其特点。现有教材大体有两种不足:一是有些知识过于陈旧,对最新的发动机技术和法规涉及很少;二是理论性太强,不太适于本科教学。为适应本科教学改革的需要,以本科教学为出发点,作者在参考大量文献基础上编写了《汽车发动机原理》教材。本书从本科教学的实际出发,本着必需、适用的原则,加强针对性和应用性,紧跟汽车发动机技术不断发展的形势,增添现代汽车发动机新技术知识,注重理论与实际相结合,在一般原理的基础上,分析影响汽车发动机使用性能的各种因素,讨论提高发动机性能指标的技术措施。本书保留了发动机性能的基本理论,删除了过于陈旧的知识 and 过强的理论性推导,比如化油器式汽油机的内容;增加了工程热力学基础知识和新技术原理,包括汽油机和柴油机的电控技术原理、汽油机涡轮增压的解决方法、汽车发动机排放的新法规等。本书的教学参考学时为40~48。

本书共分为九章,其主要内容包括:工程热力学基础、发动机循环与性能指标、发动机的换气过程、发动机的燃料与燃烧、汽油机混合气形成和燃烧、柴油机混合气形成和燃烧、发动机特性、废气涡轮增压技术、发动机排放污染与噪声等。每章都有本章内容和要点以及课后思考题供教师和学生参考。

全书主要由东北林业大学和哈尔滨华德学院的老师进行编写,参加编写的有阎春利(第一、二、三、五章)、陈萌(第四、九章)、王宪彬(第六、八章)、李长威(第七章)。

全书由阎春利、李长威任主编,孙凤英教授承担主审工作。

本书编写过程中,参阅了许多相关的文献资料,在此对文献的作者以及为我们提供资料的朋友和同仁表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免出现纰漏、不足及错误,诚请广大读者批评指正。

编 者

2013年11月于哈尔滨

目 录

前言

第一章 工程热力学基础	1
第一节 热功转换的基础知识	1
一、基本概念	1
二、功和热量	5
第二节 热力学第一定律及应用	7
一、热力学第一定律	7
二、工质的热力学能	7
三、闭口系统能量方程	8
四、开口系统稳定流动能量方程式	9
第三节 理想气体的热力过程	10
一、定容过程	11
二、定压过程	12
三、定温过程	13
四、绝热过程	14
五、多变过程	15
第四节 热力学第二定律及应用	17
一、热力循环与热效率	17
二、热力学第二定律	19
三、卡诺循环与卡诺定理	19
四、孤立系统的熵增原理	20
复习思考题	20
第二章 发动机的循环与性能指标	22
第一节 发动机的理论循环	22
一、发动机实际工作循环的简化与评价	22
二、发动机的理论循环	23
三、理论循环的影响因素分析	26
第二节 四冲程发动机的实际循环与热损失	27
一、发动机的实际循环过程	27
二、实际循环的热损失	29
第三节 发动机的热平衡	31
一、发动机燃料燃烧发出的热量 Q_T	31
二、转化为有效功的热量 Q_E	31
三、传给冷却介质的热量 Q_S	32
四、废气带走的热量 Q_R	32

五、燃料不完全燃烧的热损失 Q_B	32
六、其他热量损失 Q_L	32
第四节 发动机性能指标	34
一、指示指标	34
二、有效指标	35
三、发动机强化指标	38
第五节 机械效率	38
一、机械效率的定义	38
二、机械损失及其测定	39
三、影响机械效率的主要因素	40
复习思考题	41
第三章 发动机的换气过程	42
第一节 四冲程发动机的换气过程	42
一、换气过程	42
二、换气损失	43
第二节 充量与充气效率	44
一、充量	44
二、充气效率	45
第三节 影响充气效率的因素	46
一、进气终了压力	46
二、进气终了温度	47
三、转速与配气相位的影响	47
四、负荷的影响	48
五、压缩比的影响	48
六、排气终了压力	49
第四节 提高充气效率的措施	49
一、减少进气系统的阻力	49
二、合理选择配气定时	51
三、减少排气系统阻力	51
四、减少对新鲜充量的加热	52
第五节 进、排气管的动态效应	52
一、进气管的惯性效应	52
二、进气管波动效应	52
三、转速与管长	53
四、排气管动态效应	54
第六节 可变技术	54
一、可变进气管	54
二、可变气门定时	55
复习思考题	57
第四章 发动机的燃料与燃烧	58



第一节 发动机燃料	58
一、石油中烃的分类及性质	58
二、燃料的提炼方法及对燃料性能的影响	59
三、代用燃料及其特性	60
第二节 燃料的使用特性	63
一、柴油	63
二、汽油	65
三、汽油和柴油性能的差异对发动机性能的影响	69
第三节 燃烧热化学	69
一、1kg 燃料完全燃烧所需的理论空气量	70
二、过量空气系数	70
三、 $\alpha > 1$ 时完全燃烧的产物及数量	71
四、燃料热值与混合气热值	71
第四节 燃烧的基本知识	72
一、着火理论	72
二、发动机的燃烧方式	77
复习思考题	80
第五章 汽油机混合气形成和燃烧	81
第一节 汽油喷射式发动机混合气	81
一、汽油机不同工况对混合气的要求	81
二、汽油喷射系统混合气形成	81
三、燃油喷射系统组成及控制方法	82
第二节 汽油机正常燃烧	83
一、正常燃烧过程进行情况	83
二、燃烧速度	85
三、汽油机不规则燃烧	85
第三节 汽油机不正常燃烧	86
一、爆燃	86
二、表面点火	87
第四节 影响燃烧过程的因素	89
一、燃料的影响	89
二、混合气成分	89
三、点火提前角	90
四、发动机转速	90
五、发动机负荷	91
六、冷却液温度	91
七、压缩比	92
八、气缸直径	92
九、气缸盖、活塞材料及燃烧室积炭	92
第五节 汽油机的燃烧室	92

一、燃烧室的布置	92
二、典型燃烧室	93
三、其他类型的燃烧系统	94
复习思考题	95
第六章 柴油机混合气形成和燃烧	96
第一节 柴油机混合气形成与燃烧室	96
一、柴油机混合气形成特点与方式	96
二、柴油机燃烧室	97
第二节 柴油机的喷射与雾化	100
一、燃油喷射过程	100
二、喷油规律	101
三、不正常喷射	102
四、燃油的喷雾特性	103
第三节 柴油机的燃烧过程	104
一、燃烧过程	104
二、燃烧过程存在的问题	105
第四节 影响燃烧过程的因素	106
一、燃油方面的因素	106
二、结构方面的因素	107
三、使用方面的因素	109
第五节 柴油机电控技术	111
一、基本要求	111
二、电控柴油喷射系统的基本类型	111
三、电控柴油喷射系统的控制功能	114
复习思考题	119
第七章 发动机的特性	120
第一节 概述	120
一、发动机的工况	120
二、发动机的台架试验	122
三、试验方法	125
四、发动机特性的分析方法	126
第二节 发动机的负荷特性	127
一、汽油机负荷特性	127
二、柴油机负荷特性	128
三、负荷特性曲线特点	129
四、汽油机和柴油机负荷特性区别	129
第三节 发动机的速度特性	130
一、汽油机的速度特性	130
二、柴油机的速度特性	132
三、汽油机和柴油机速度特性的比较	135



第四节 发动机的万有特性·····	136
一、汽油机与柴油机万有特性的比较·····	137
二、万有特性曲线的特点·····	138
三、万有特性曲线的应用·····	138
第五节 柴油机的调速特性·····	139
一、调速器与调速特性·····	139
二、调速器工作指标·····	141
复习思考题·····	142
第八章 废气涡轮增压技术·····	143
第一节 发动机增压概述·····	143
一、增压的可行性及特点·····	143
二、增压的衡量指标·····	144
三、发动机增压的种类·····	144
第二节 废气涡轮增压系统构造及特性·····	146
一、压气机构造·····	146
二、离心式压气机工作原理·····	147
三、离心式压气机工作特性·····	147
四、涡轮机构造与工作原理·····	148
五、废气涡轮增压的分类·····	149
第三节 增压的要求及与发动机匹配·····	150
一、对车用增压器的要求·····	150
二、增压器与发动机的匹配·····	151
第四节 车用发动机增压的特殊问题及改善措施·····	152
一、车用发动机增压的特殊问题·····	152
二、增压发动机优化措施·····	153
第五节 汽油机增压技术·····	154
一、汽油机涡轮增压的特点·····	154
二、汽油机涡轮增压的主要技术措施·····	156
复习思考题·····	159
第九章 发动机排放污染与噪声·····	160
第一节 汽油机的有害排放物及其控制·····	160
一、汽油机的有害排放物及其产生机理·····	160
二、汽油机排放控制技术·····	162
第二节 柴油机的排放控制技术·····	164
一、机内措施·····	164
二、后处理技术·····	165
第三节 汽车排放标准·····	169
一、国外汽车排放法规与控制历程·····	169
二、我国汽车排放标准·····	175
第四节 发动机噪声及控制·····	179



一、发动机噪声的分类	180
二、燃烧噪声及其控制	180
三、空气动力噪声及其控制	182
四、机械噪声及其控制	184
复习思考题	187
参考文献	188

第一章 工程热力学基础

【本章内容及要点】

本章重点介绍工程热力学中涉及发动机燃烧的一些基本概念，定容、定压、定温、绝热四种特殊热力过程参数间的关系及计算，热力学第一定律以及热力学第二定律。

本章教学目的是掌握热力学基本概念和基本热力过程，理解热力学第一定律和第二定律。

热力学是研究热能性质及其转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个分支。它着重研究与热力工程有关的热能和机械能相互转换的规律。在阐明两条基本定律的基础上，分析热力工程有关热力过程及热力循环的问题，从理论上研究提高热工转换效率的有效途径。

本章仅就工程热力学基础知识作简要阐述，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。

第一节 热功转换的基础知识

一、基本概念

(一) 热力系统

热力学中研究热功转换时，总是研究固定的一些物体或固定空间中的一些物质，在热功转换过程中的行为和它们的变化。热力学中把主要研究对象总称为热力系统。把热力系统外面和热功转换过程有关的其他物体称为外界；热力系统和外界的分界面称为边界。通常把实现热功转换的工作物质称为工质。把供给工质热量的高温物质称为高温热源；而把吸收工质放出热量的冷却介质或环境称为低温热源。热力系统通常是由热力设备中的工质组成，而高温热源、低温热源和其他物体等则组成外界。

若一个热力系统和外界只可能有能量（热能、机械功等）交换而无物质交换，则称为闭口系统。若一个热力系统和外界既可能有能量交换，同时又有物质交换，则称为开口系统。

(二) 气体的热力状态及其状态参数

热力学中把工质所处的宏观状态称为工质的热力状态。工质的状态常用物理量来描述，这些物理量称为状态参数。常用的状态参数有6个，即压力（ p ）、温度（ T ）、比体积（ v ）、热力学能（ U ）、焓（ H ）、熵（ S ）。其中 p 、 T 、 v 三个可以测量的物理量称为基本状态参数。

1. 压力（ p ）

气体对单位面积容器壁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。压力的单位为Pa，工程上常用kPa与MPa。



容器内气体压力的大小有两种不同的表示方法：一种是指气体施于器壁上压力的实际数值，叫绝对压力，符号为 p ；另一种是测量时压力计的读数，叫表压力，符号为 p_g 。由图 1-1 可知，表压力是绝对压力高出当时当地的大气压力 p_a 的数值。其关系式为

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

如果容器内气体的绝对压力低于外界大气压力时，表压力为负值，仅取其数值，称为真空度，记作 p_v ，即

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

真空度的数值越大，说明越接近绝对真空。

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。按照分子运动论，气体的温度是气体内部分子不规则运动激烈程度的量度，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。

热力学温度 T 的单位为 K，是国际单位制 SI 中的基本单位。选取水的三相点温度为基本定点温度，规定其温度为 273.16K，1K 等于水的三相点热力学温度的 1/273.16。国际单位制 (SI) 容许使用摄氏温度 t ，并定义

$$t = T - T_0 \quad (1-3)$$

$$T_0 = 273.15K$$

在一般工程计算中，把 T_0 取作 273K 已足够精确。摄氏温度每一度间隔与热力学温度每一度间隔相等，但摄氏温度的零点比热力学温度的零点高 273.15K。热力学温度不可能有负值。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容积，单位为 m^3/kg ，即

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

式中 v ——比体积；

V ——容积；

m ——质量。

比体积的倒数称为密度 ρ 。密度是指单位容积的物质所具有的质量，单位为 kg/m^3 ，即

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

(三) 平衡状态

描述热力系统的状态时，如果整个系统的状态均匀一致，在系统内到处有相同的温度和相同的压力，且不随时间而变化，这样的状态称为热力学平衡状态，简称平衡状态。处于平衡状态时，气体的所有状态参数都有确定的数值。如果外界条件不变，系

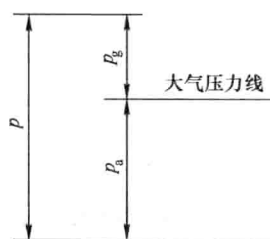


图 1-1 表压力、真空度与绝对压力的关系

统的状态始终保持不变。如果受到外界作用，引起系统内温度和压力的变化，破坏了系统平衡状态，则当外界作用停止后，系统将自发地发生机械和热作用，最后系统达到新的平衡状态。

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，称为热力过程。

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。

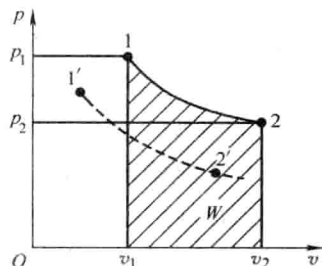


图 1-2 内平衡过程在 $p-v$ 图上的表示

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，简称压强图，用来进行热力学分析。如图 1-2 所示，1、2 两点分别代表 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。

在图 1-2 中，假设系统经历平衡过程 1—2，由状态 1 变化到状态 2，并对外做膨胀功 W ，如果外界给以同样大小的压缩功 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，恢复到原来的状态 1，外界也回复到原来的状态，既没有得到功，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。

（四）理想气体状态方程式

所谓理想气体，就是假设在气体内部，其分子不占体积，分子间又没有吸引力的气体。在热力计算和分析中，常常把空气、燃气、烟气等气体都近似地看做理想气体。因为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，气体之间的吸引力也很小。通常把实际气体近似地看做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）。对于 1kg 理想气体，其状态方程为

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

对于 m kg 理想气体，总容积 $V = mv$ ，其状态方程为

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

式中 R ——某种气体常数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]，它的数值决定于气体的种类。

对于摩尔质量的理想气体，其状态方程为



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

式中 R_m ——摩尔气体常数 [$J/(mol \cdot K)$];

V_m ——摩尔体积 (m^3/mol)。

对于任何理想气体, R_m 的数值都相同, 并称为普通比例常数。

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, 即 $F(p, v, T) = 0$, 只要知道其中两个参数, 就可以通过该方程求出第三个参数。

(五) 工质的比热容 (质量热容)

在热力过程中, 热量的计算常利用比热容。工质的比热容就是热容除以质量。比热容的物理量符号用 c 表示, 单位符号为 $J/(kg \cdot K)$ 。按定义

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

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 (J)。

比热容是物质的一个重要的热力学性质。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. 单位工质的热容与物理量单位的关系

单位工质可用 kg 、 mol 、 m^3 表示, 因此单位工质的热容有如下三种:

- 1) 比热容 (质量热容) c , 单位 $J/(kg \cdot K)$ 。
- 2) 摩尔热容 c_m , 单位 $J/(mol \cdot K)$ 。
- 3) 标准状态下的体积热容 c_V , 单位 $J/(m^3 \cdot K)$ 。

2. 比定压热容和比定容热容

气体在压力不变或容积不变条件下被加热时的比热容, 分别叫做比定压热容和比定容热容, 通常用脚标 p 和 V 来识别。定义比热比 $\gamma = c_p/c_V$ 。

气体在定压下受热时, 由于在温度升高的同时, 还要克服外界抵抗力而膨胀做功, 所以同样升高 $1^\circ C$, 比在定容下受热时需要更多的热量。实验表明, 理想气体的比定压热容和比定容热容的差是一个常数, 即

$$c_p - c_V = R \quad (\text{梅耶公式}) \quad (1-9a)$$

对于理想气体, 等熵指数 κ 为

$$\kappa = \gamma = \frac{c_p}{c_V}$$

等熵指数在工程热力学中有很重要的作用。如果以 κ 和 R 来表示 c_p 和 c_V , 由梅耶公式可得:

$$\begin{aligned} c_V &= \frac{1}{\kappa - 1} R \\ c_p &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} R \end{aligned} \quad (1-9b)$$

3. 常量比热容

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, 把理想气体的比热容当做常量, 只按理想气体的原子数确定比热容, 称为定比热容, 见表 1-1。

表 1-1 理想气体的定比热容

理想气体原子数	摩尔定容热容 $c_{V,m} / [J/(mol \cdot K)]$	摩尔定压热容 $c_{p,m} / [J/(mol \cdot K)]$
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

二、功和热量

(一) 功

力学中把物体所受到的力 F 和物体在力的作用方向上的位移 x 两者的乘积，定义为力所做的功，并用符号 W 表示即

$$W = Fx$$

热力学中，功就是当系统和外界之间存在压差时，系统通过边界和外界之间相互传递的能量。

图 1-3 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。设活塞截面积为 A (m^2)，工质作用在活塞上的压力为 p ，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，因而工质对活塞做的功为

$$dW = pAdx = pdV = mpdv \quad (1-10)$$

对可逆过程 1—2，单位工质由状态 1 膨胀到状态 2 所做的膨胀功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-11)$$

如果已知工质的初、终态参数，以及过程 1—2 的函数关系 $p = f(v)$ ，则可求得单位工质的膨胀功 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。由图可见，膨胀功不仅与状态的改变有关，而且与状态变化所经历的过程有关。

若气缸中的工质为 m ，其总容积为 $V = mv$ ，则膨胀功为

$$W = mw = m \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-12)$$

当工质不是膨胀，而是受到外界压缩时，则是外界对工质做功。这时 dv 为负值，由式 (1-12) 算出的 W 也是负值，负的膨胀功实际上表明工质接受了外界的压缩功。

(二) 热量

热量是由于温度的不同，系统和外界间穿越边界而传递的能量。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，但热量不可能把它的全部能量表现为使物体改变宏观运动的状态。

热量和功的根本区别在于：功是两物体间通过宏观运动发生相互作用而传递的能量；热

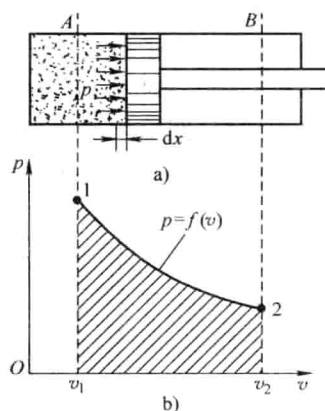


图 1-3 可逆过程的膨胀



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。

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

(三) 熵

功和热量都是工质与外界间传递的能量，故两者具有许多共同的特征。功是工质与外界发生机械作用时传递的能量。工质的压力 p 是工质对外界做功的推动力。比容 v 的变化则是衡量工质对外界做功与否的标志。用类比的方法，既然热量是工质与外界发生热交换时起推动“力”的作用，于是作为衡量工质对外界做功与否的标志，必然也应是工质的某种状态参数的变化。这种状态参数就是熵，用符号 S 表示，单位为 J/K。1kg 工质的熵称为比熵，符号为 s ，单位为 J/(kg · K)。类比于功的关系式，可以得到

$$dq = Tds \tag{1-13}$$

比熵的定义式为

$$ds = \frac{dq}{T} \tag{1-14}$$

式中 dq ——可逆过程中系统与外界交换的微元热量：

T ——可逆过程的温度（可逆过程系统与外界的温度随时保持相等）。

熵的增量等于系统在可逆过程中交换的热量除以传热时的绝对温度所得商。熵是工质的一个状态参数。对于工质的每个给定的状态，熵有确定的数值。

同功量的图示相似，也可用每个独立的状态参数 T 、 s 构成的状态图来表示热量。在 T — s 图上的一点表示一个平衡状态，一条曲线表示一个可逆过程，如图 1-4 所示。

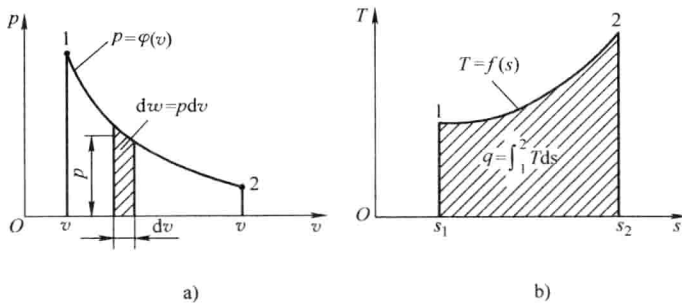


图 1-4 可逆过程的 p — v 图和 T — s 图
a) p — v 图 b) T — s 图

$$q = \int_1^2 Tds = \text{面积 } 12s_1s_2$$

因此 T — s 图上曲线 1—2 下的面积，表示该过程中的传热量 q 的大小，故 T — s 图又称为“示热图”，它在热工计算中有重要的功用。

对于 m kg 工质的热量 Q ，可按式计算：

$$Q = m \int_1^2 Tds = \int_1^2 TdS \tag{1-15}$$

从表 1-2 的对比中，可以清楚地看到熵与比容是相互对应的一个状态参数。

表 1-2 热力学的功与热

	功量	热量
表达式	$dw = p dv, w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$	$dq = t ds, q = \int_1^2 T ds$
动力	p	T
能力传递方式	$dv > 0, dw > 0$ 对外做功 $dv = 0, dw = 0$ 不做功 $dv < 0, dw < 0$ 对内做功	$ds > 0, dq > 0$ 工质吸热 $ds = 0, dq = 0$ 绝热 $ds < 0, dq < 0$ 工质放热
图示	$p-v$ 图	$T-s$ 图

熵有如下性质:

- 1) 熵是一个状态参数, 如已知系统两个独立的状态参数, 即可求出熵的值。
- 2) 只有在平衡状态下, 熵才有确定的值。
- 3) 通常只需求熵的变化量 ΔS , 而不必求熵的绝对值。
- 4) 熵是可加性的量, m kg 工质的熵是 1kg 工质熵的 m 倍, $S = ms$ 。
- 5) 在可逆过程中, 从熵的变化中可以判断热量的传递方向: $ds > 0$ 系统吸热; $ds = 0$ 系统绝热; $ds < 0$ 系统放热。

第二节 热力学第一定律及应用

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学中的一种表述。根据热力学第一定律, 建立了闭口系统和开口系统的能量方程式, 它们在进行热力分析和热力计算的主要基础。

一、热力学第一定律

热力学第一定律: 热和功可以相互转换, 为了获得一定量的功, 必须消耗一定量的热; 反之, 消耗一定量的功, 必然会产生一定量的热。

工质经历受热做功的热力过程时, 它从外界接受的热量、因受热膨胀而对外做出的功、相同时间内工质所储存或付出的能量三者之间, 必须保持收支上的平衡, 否则就不符合能量守恒的原则。

二、工质的热力学能

工质内部所具有的各种能量, 总称为工质的热力学能 (内能)。由于工程热力学主要讨论热能和机械能之间的相互转换, 不考虑化学能变化和原子核反应的热力过程, 可以认为这两部分能量保持不变, 认为工质热力学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、分子内原子振动能、原子内的电子振动能等组成。由于工质内的动能与位能都与热能有关, 也称作工质内部的热能。分子热运动动能是温度 T 的函数, 分子间的位能是比体积 v 的函数。因此, 工质的热力学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, 热力学能也就跟着改变。单位质量工质的热力学能 (比热力学能) u 也是一个状态参数, 其单位是 J/kg