



21世纪汽车专业“十一五”规划新教材



发动机原理 与汽车理论

郑军 主编



天津科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

发动机原理与汽车理论 / 郑军主编. —天津:
天津科学技术出版社, 2009. 12
ISBN 978-7-5308-5419-8

I. ①汽… II. ①郑… III. ①汽车—发动机—理论—
高等学校: 技术学校—教材 ②汽车—理论—高等学校: 技
术学校—教材 IV. ①U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 209415 号

责任编辑: 布亚楠
编辑助理: 吴 捷
责任印制: 王 莹

天津科学技术出版社出版
出版人: 胡振泰
天津市西康路 35 号 邮编 300051
电话(022)23332403(编辑室) 23332393(发行部)
网址: www.tjkjcs.com.cn
新华书店经销
北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 11.75 字数 18 万字
2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
定价: 29.80 元

目 录

项目一 工程热力学基础	1
活动一 气体的热力性质	1
活动二 热力学第一定律	5
项目二 发动机原理	15
活动一 发动机热力循环	15
活动二 发动机的性能指标	24
活动三 发动机的换气过程	35
活动四 发动机废气涡轮增压	46
活动五 发动机燃烧过程	56
活动六 发动机特性	80
项目三 汽车理论	94
活动一 作用于汽车的各种外力	94
活动二 汽车的动力性	106
活动三 汽车的制动性	121
活动四 汽车的燃料经济性	143
活动五 汽车操纵稳定性	153
活动六 汽车的行驶平顺性	170
活动七 汽车的通过性	177
参考文献	183

一、基本概念

1. 工质

热力学中,一般将能实现热能和机械能相互转换的媒介物质叫工质,汽车发动机采用的工质均为气体。

2. 热力系统

凡是能传递热量从一种物质传递到另一种物质的系统,称为热力系统。

热力学中常将系统作为分析对象选取的高温热源范围内的物质或空间,系统以外的物质

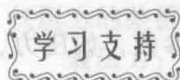
项目一 工程热力学基础



情景描述

工程热力学主要研究热能与机械能相互转换的规律，以及合理有效利用热能的基本理论。

工程热力学基础主要简介热力学基础知识、工质的热力性质、热力过程及热力循环等基本概念。教材除加强热力学理论基础外，更多地注重在汽车工作中的应用，使读者能运用基础理论来分析工程实践中的各种热力过程和热力循环，以达到培养读者理论与实践相结合的目的。



本项目知识目标：

1. 理解工程热力学中工质的基本概念与状态参数；
2. 掌握理想气体状态方程；
3. 了解热力学第一定律，理解能量守恒定律；
4. 对热力学第一定律的数学表达式有简单认识；
5. 明确永动机是不可能实现的。

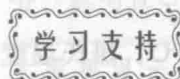
活动一 气体的热力性质



活动背景

工程热力学是一门重要的技术基础课程，研究热能和其他形式能量（特别是机械能）相互转换规律以及提高能量利用经济性的一门学科。

工程热力学是关于热现象的宏观理论，其研究的方法也是宏观的。它以归纳无数事实所得到的热力学第一定律、热力学第二定律和热力学第三定律作为推理的基础，通过物质的压力、温度、比容等宏观参数和受热、冷却、膨胀、收缩等整体行为，对宏观现象和热力过程进行研究。



一、基本概念

1. 工质

热力学中，一般将能实现热能和机械能相互转换的媒介物质叫工质，汽车发动机采用的工质均为气体。

2. 热力系统

凡是能将热量从一种物质传递到另一种物质的系统，称为热力系统。

热力学研究中系统作为分析对象选取的某特定范围内的物质或空间。系统以外的物质

或空间称为外界。系统与外界之间的界限称为分界面，分界面可以是真实的或假想的、固定的或移动的，如图 1-1。

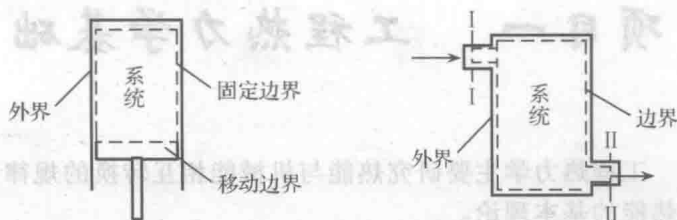


图 1-1 热力系统

3. 热力状态

热力学中热力系统在某一瞬间所处的某种宏观物理状态，简称状态。

描述工质所处热力状态的物理量称为工质的热力状态参数，简称状态参数，如压力、温度和比容等。

4. 热力过程

热力学中，热力系统中的工质从某一状态变化到另一状态所经历的过程称为热力过程。

二、基本状态参数

在发动机原理中一般将工质的温度 (T)、压力 (P) 和比体积 (V) 三个可测量的状态参数，称为工质的基本状态参数。

1. 温度

温度是表明物体冷热程度的物理量，它的高低反映物体内部分子无规则运动的剧烈程度，是物体状态的基本参数之一。温度，是分子平均动能的标志，是状态量。

热力学中的温度是衡量一个热力系统是否与其他热力系统处于热平衡的标志，一切处于热平衡的系统都具有相同的温度。

温度的数值表示法，称为温度标尺或“温标”。在国际单位制中采用热力学温标，也就是采用开尔文（开氏）温度或绝对温标度，用符号 T 表示，单位是 K。规定水的三相点（冰、水、气三相平衡共存时的状态）的温度为 273.16K，每 1K 的间隔 1°C 。

工程上常用的还有摄氏温度，摄氏温度符号为 t ，单位是摄氏度，符号 $^{\circ}\text{C}$ ，摄氏温度与热力学温度的关系为：

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

换算关系式简化为：

重要提示

$$t = T - 273$$

注意：只有开氏温度才是状态参数，开氏温度均为正值。

2. 压力

单位面积上所受的垂直作用力称为“压力”，即压强，用 p 表示。方向：垂直于受力



物体表面,并指向受力物体。作用点:在物体的接触面上。其物理本质可据气体分子运动理论理解:装在容器中的大量分子,总是处于永远不停的热运动之中,它们除了相互碰撞之外,还不断地和容器壁碰撞。大量分子碰撞容器壁的总结果,形成了气体对容器壁的压力。

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。

在国际单位制中,压力的单位是帕斯卡,简称帕,单位符号为 Pa。这是为了纪念科学家帕斯卡而命名的,即牛顿/平方米 (N/m^2),即 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$,工程上常用千帕 (kPa)、兆帕 MPa 做单位。

$$1\text{KPa} = 10^3\text{Pa}, 1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

绝对压力:容器中的气体作用于容器内壁的真实压力,称为绝对压力,绝对压力 P 是气体的状态参数之一。

压力测量仪表通常处于大气环境中,因此仪表指示的并非气体的真实压力而是它与大气压力的差值,因此,绝对压力一般通过压力换算得到。

表压力:当绝对压力高于大气压力时,压力测量仪表所指示的是绝对压力超出大气压力的部分,称为表压力 (P_B)。

表压力: $P_B = P - P_0$ 。

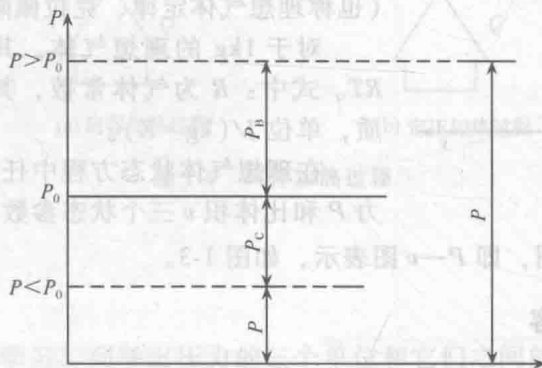


图 1-2 绝对压力、表压力与真空度的相互关系

当气体的绝对压力低于大气压力时,真空计所指示的是绝对压力低于大气压力的部分,称为真空度 (P_C),真空度 $P_C = P_0 - P$ 。

重要提示

绝对压力、表压力、真空度和当地大气压力的关系可归纳如图 1-2 所示。

注意:只有绝对压力才是气体的状态参数。

3. 比体积

比体积是单位质量的物质所占的体积,用符号 v 表示,单位 m^3/kg 。

若质量为 m 的物质所占容积为 V ,则比体积为:

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

式中: m 为气体的质量,单位 kg;

V 为气体的总容积, 单位 m^3 。

单位容积的质量称为密度, 用符号 ρ 表示:

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

即物质的比体积与密度互为倒数的关系。

三、理想气体状态方程

重要提示

理想气体又称“完全气体”, 是理论上假想的一种把实际气体性质加以简化的气体。将分子本身的体积和分子间的作用力都可以忽略不计的气体, 称为理想气体。理想气体是一种理想化的模型, 实际并不存在。发动机工作过程中缸内的各类气体的性质很近似理想气体, 近似地看做理想气体。

在热力学中把理想气体的温度、压力和比体积三个基本状态参数之间的关系称为理想气体状态方程 (也称理想气体定律、克拉佩隆方程)。

对于 1kg 的理想气体, 其状态方程式为: $PV = RT$ 。式中: R 为气体常数, 其数值取决于气体的性质, 单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

在理想气体状态方程中任意状态下的温度 T 、压力 P 和比体积 v 三个状态参数, 它们之间的相互关系

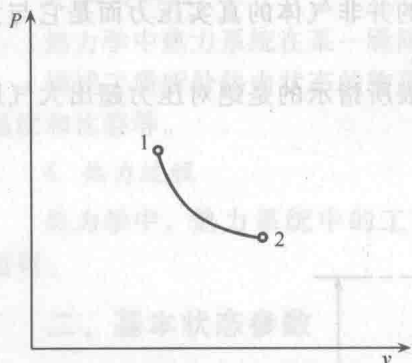


图 1-3 $p-v$ 图

可用压力—比体积坐标图, 即 $P-v$ 图表示, 如图 1-3。

四、工质的比热容

在工程热力学中, 为了说明工质吸热 (或放热) 能力的大小, 即热量计算常引用比热容概念。

学习支持

1. 定义

工质的比热容就是单位量的物质温度升高 (或降低) 1K 所吸收 (或放出) 的热量, 用 c 表示, 单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2. 分类

1) 根据工质数量多少所取单位不同分类。

(1) 质量比热容: 1kg 气体温度升高 (或降低) 1K 所吸收 (或放出) 的热量, 用 c 表示, 单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(2) 容积比热容: 1m^3 气体温度升高 (或降低) 1K 所吸收 (或放出) 的热量, 用 c' 表示, 单位 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

(3) 摩尔比热容: 1kmol 气体温度升高 (或降低) 1k 所吸收 (或放出) 的热量, 用



C 表示, 单位 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

2) 根据工质在加热 (或冷却) 过程中的性质不同分类

(1) 定容比热容: 气体在加热过程中容积保持不变的比热容, 用符号 c_v 表示。加入的热量用于使工质的温度升高, 不对外做功。

(2) 定压比热容: 气体在加热 (或冷却) 过程中压力保持不变的比热容, 用符号 c_p 表示。加入的热量用于除使工质的温度升高以外, 还推动活塞移动一定的距离, 对活塞做功。一般 c_p 大于 c_v 。

两种加热过程见图 1-4。

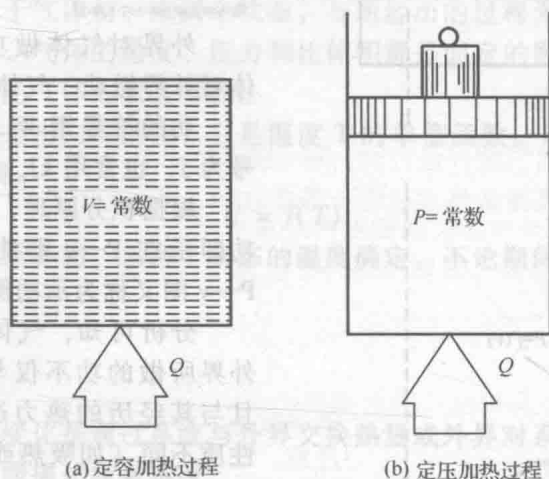


图 1-4 两种加热过程

实践活动

1. 结合中学的物理学习, 列举出压力的三个单位和它们之间的换算关系。
2. 某压力测量仪表指示的压力为 $1.41 \times 10^5 \text{ Pa}$, 试计算该发动机内的绝对压力大致为多少。
3. 已知某理想气体在标况下的质量比热容为 $6 \times 10^5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 试求它的容积比热容和摩尔比热容。
4. 假设一部分理想气体的比体积是 $0.45 \text{ m}^3/\text{kg}$, 问该理想气体的密度是多少?

活动二 热力学第一定律



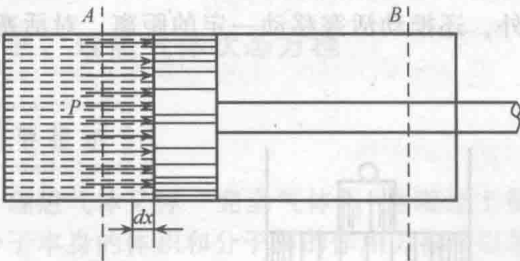
活动背景

热可变成功, 功也可变成热; 一定量的热消失时, 必产生一定量的功; 消耗一定量的功时, 必出现与之对应的一定量的热, 传递和转换过程中, 能量的总值不变。

一、功、热量与内能

1. 功

做功是改变系统能量实现系统内外能量交换的一种方法。在热力学中，功是指在气体的压力和容积发生变化时，气体与外界之间相互传递的机械能。



原理描述

外界对气体做功，气体内能增大；气体对外界做功，气体内能减小。

功的符号用 W 表示，单位为焦耳，符号为 J，也常用 kJ， $1\text{kJ} = 10^3\text{J}$ 。

根据积分原理，1kg 气体对外界所做的功即是在 $P-v$ 图曲线下面的面积，为此 $P-v$ 图又称为示功图，如图 1-5。

分析可知，气体状态发生变化时，对外界所做的功不仅与其初始状态有关，而且与其经历的热力过程有关。热力过程的性质不同（如吸热或放热），气体的压力 P 和比体积 v 之间的函数关系也不同。当气体的状态变化使容积（或比体积）增加时，气体膨胀，气体对外界做正功；同理可知，当气体的状态变化使容积（或比体积）减小时，气体压缩，气体对外界作负功，也叫外界对气体做功使气体压缩。

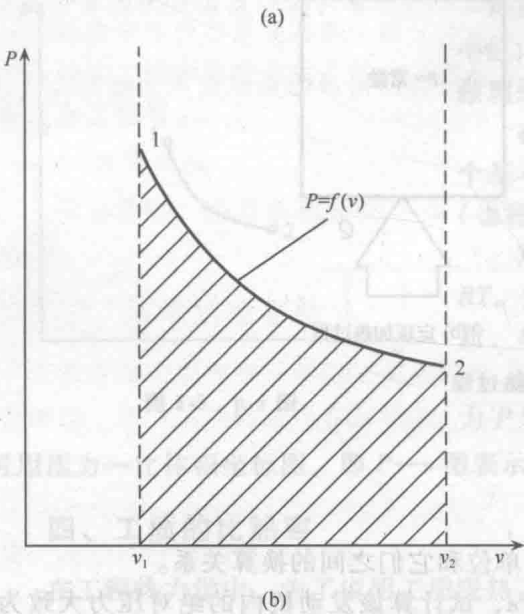


图 1-5 1kg 气体对外所作的功

2. 热量

系统与外界之间由于存在温度差而传递的能量。热的本质是传递的能量，该能量的多少就是热量，热量是系统内能变化的一种量度，是过程量。

热量是在热传递过程中，物体吸收或放出热的多少，其实质是内能的变化量。热量跟热传递紧密相连，离开了热传递就无热量可言。

功和热量都不是气体的状态参数，它们的数值与气体所处的状态无关。功是两物体间通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量，热量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。功是能量传递与转化的量度。

通常 1kg 气体对外界传递的热量用符号 q 表示，mkg 气体对外界传递的热量用符号 Q 表示。热量的单位和功的单位相同，均为焦耳，单位符号为 J，也常用 kJ 作为热量的单位。

外界向气体传递热量，气体内能增大，吸收的热量为正，气体向外界传递热量，气体内能减小，放出的热量为负。



原理描述

3. 内能

内能是物体内部所有分子做无规则运动的动能和分子势能的总和。气体的内能就是气体内部所具有的各种能量的总和，从微观上说，内能包括系统内分子热运动的各种动能（平动动能、转动动能、振动动能）、分子间的相互作用能、分子内原子间的振动势能、原子内的能量、原子核内的能量和分子间的位能等。

内能的改变只决定于气体初、末两个状态，与所经历的过程无关，内能是“状态量”，即当气体的状态一定时，气体的温度、压力和比体积都是固定的数值，其内能也必然有固定的数值，因此内能也是气体的状态参数。

理想气体的内能仅是指内部动能，它是温度 T 的单值函数。1kg 气体的内能用符号 U 表示，单位 (J/kg)，即：

$$U = f(T)$$

由此可见，只要工质的初、末两个状态的温度确定，不论期间经过什么过程，其内能的变化量 Δu 都相等。

重要提示

热力学系统内能的变化是通过系统与外界交换热量或外界对系统做功来实现的。热量描述能量的流动，而内能描述能量本身。

综述：内能是系统状态的函数，物质的状态一定，内能也一定，当系统从一个状态变化到另一个状态时，不管它的变化过程如何，内能的改变总是一个定值。那么，怎样改变系统的状态，从而引起系统内能的变化呢？

原理描述

通常有两种方式：做功和传热，即物体内能的增加等于物体吸收的热量和对物体所做的功的总和，可表示为： $\Delta U = W + Q$ 。

二、热力学第一定律

能量转换与守恒定律是自然界的基本规律之一，热力学第一定律是对能量守恒和转换定律的一种表述方式。

热力学第一定律是热力学的基本定律，它适用于一切工质和一切热力过程。热力学第一定律确定了热能和机械能可以相互转换，并在转换时存在着确定的数量关系，所以热力学第一定律也称为当量定律。

热力学第一定律指出：自然界中一切物质都具有能量，能量不可能被创造，也不可能被消灭；但能量可从一种形态转变为另一种形态，热能可以从一个物体传递给另一个物体，也可以与机械能或其他能量相互转换，在传递和转换过程中，能量的总值不变。

热可变成功，功也可变成热，如 Q 表示转变为功的热量， W 表示转换过来的功，则 $Q = W$ 。

重要提示

热力学第一定律明确指出,不消耗能量而得到机械功的第一类永动机是不可能造成的。这是许多人幻想制造的能不断地作功而无需任何燃料和动力的机器,是能够无中生有、源源不断提供能量的机器。显然,第一类永动机违背能量守恒定律。

根据热力学第一定律可知,物体内能的改变量 $\Delta U = W + Q$,运用此公式时,需要注意各物理量的符号:物体内能增加时, ΔU 为正,物体内能减少时, ΔU 为负;外界对物体做功时, W 为正,物体对外界做功时, W 为负;物体吸收热量时, Q 为正,物体放出热量时, Q 为负。

三、基本热力过程

发动机的工作是靠热力循环进行的,每个热力循环都是由相当复杂的热力过程所构成的,在工程热力学中,典型的热力过程有等容过程、等压过程、等温过程、绝热过程和多变过程。

1. 等容过程

(1) 定义

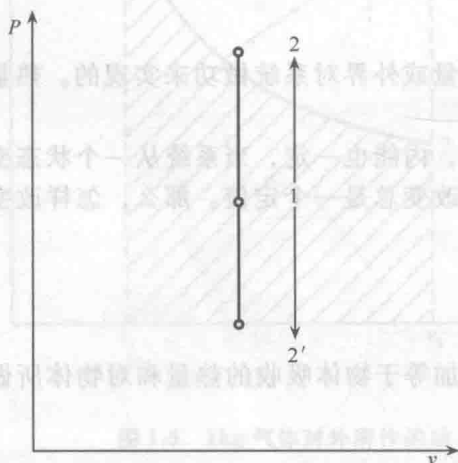


图 1-6 等容过程 $p-v$ 图

工质的比体积始终保持不变的热力过程称为等容过程,又称定容过程,是体积不变的热力学过程。如密闭容器内气体的加热或冷却即属于此过程。 $\Delta V = 0$ 。

(2) 方程式

等容过程的特点是: $v = \text{常数}$ 。

在 $p-v$ 图中,等容线是一条垂直于轴的直线。图 1-6 中的 1-2 线或 1-2' 线。

(3) 气体状态参数的变化

对理想气体而言,等容过程中压强与温度的关系,可由理想气体状态方程得出: $\frac{p}{T} = \text{常数}$,即:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

(4) 气体做的功

因为 $v = \text{常数}$,所以气体所做的功为零。

(5) 气体的热量交换

过程 1-2, $T_2 > T_1$, $q > 0$,为加热过程;过程 1-2', $T_1 > T_2'$, $q < 0$,为冷却过程。

(6) 内能的变化

过程 1-2, $q > 0$, $\Delta U > 0$,工质所吸收的热量全部转化为内能的增量;过程 1-2', $q < 0$, $\Delta U < 0$,工质所排放的热量等于内能的减量。

2. 等压过程

(1) 定义



工质压力保持定值不变的热力过程，称为等压过程。 $\Delta p = 0$ 。

(2) 方程式

等容过程的特点是： $p = \text{常数}$ 。

在 $p-v$ 图中，等压线是一条平行于 v 轴的直线。图 1-7 中 1-2 线或 1-2' 线。

(3) 气体状态参数的变化

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

(4) 气体做的功

过程 1-2, $W > 0$, 为温度升高的膨胀 (比体积增加) 过程; 过程 1-2', $W < 0$, 此过程为温度降低的压缩 (比体积减少) 过程。

(5) 气体的热量交换

过程 1-2, $q > 0$, 为吸热过程, 过程 1-2', $q < 0$, 为放热过程。

(6) 内能的变化

过程 1-2, $\Delta U > 0$, 工质所放出的热量来自内能的减少和对外输出功;

过程 1-2', $\Delta U < 0$, 工质所吸收的热量用于内能的增加, 来自消耗外功。

3. 等温过程

(1) 定义

工质温度保持定值不变的热力过程，称为等温过程。 $\Delta T = 0$ 。

(2) 方程式

等容过程的特点是： $T = \text{定值}$, $PV = RT = \text{常数}$ 。在 $p-v$ 图中，等温线是一条以坐标轴为渐近线的等边双曲线，如图 1-8。

(3) 气体状态参数的变化

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{常数}$$

(4) 气体做的功

过程 1-2, $W > 0$; 过程 1-2', $W < 0$ 。

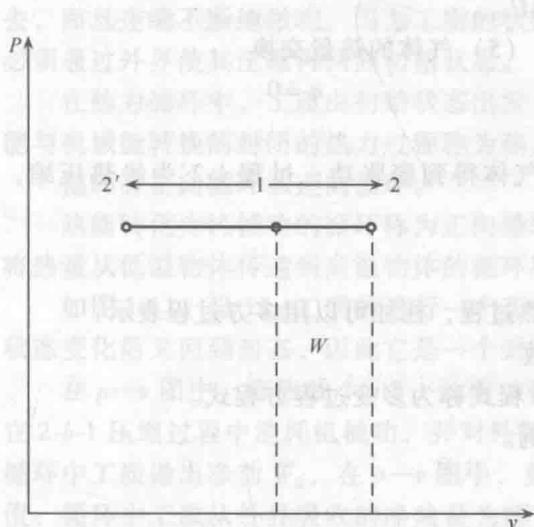


图 1-7 等压过程 $p-v$ 图

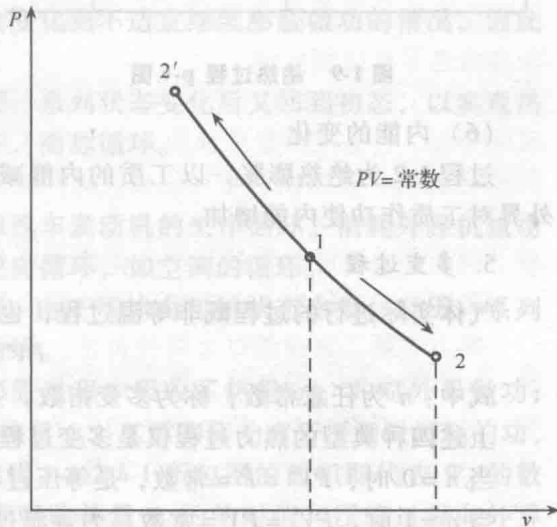


图 1-8 等温过程 $p-v$ 图

(5) 气体的热量交换

根据理想气体热力性质, $\Delta T = 0$, 即 $\Delta U = 0$

$$q = \Delta U + W = c_v \Delta T + W = 0 + W = W$$

(6) 内能的变化

$$\Delta U = c_v \Delta T = 0$$

过程 1-2, 工质所吸收的热量用于对外做功; 过程 1-2' 放出的热量从外界对工质做功转化得到。

4. 绝热过程

(1) 定义

工质与外界始终没有热量交换时, 工质所进行的热力过程称为绝热过程。

(2) 方程式

$$PV^k = \text{常数}$$

式中: k 为绝热指数。

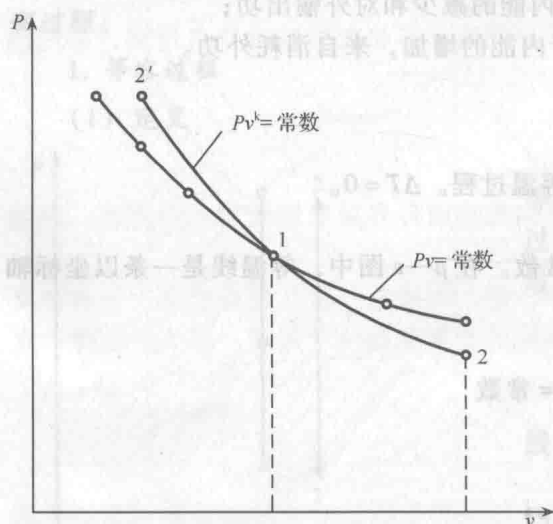


图 1-9 绝热过程 p-v 图

上式即为理想气体绝热过程 $p-v$ 函数关系式, 称为泊松公式。在 $p-v$ 图中, 绝热线是一条以坐标轴为渐近线的不等边曲线, 如图 1-9。因为 $k > 1$, 由图可看出, 在绝热膨胀过程中, 工质压力下降的速度快于等温膨胀压力下降速度。

(3) 气体状态参数的变化

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

(4) 气体做功

因为 $dq = 0$, $\Delta U + W = 0$, 所以, $W = -\Delta U$ 。

(5) 气体的热量交换

$$q = 0$$

(6) 内能的变化

过程 1-2 为绝热膨胀, 以工质的内能减少使气体得到膨胀功; 过程 1-2' 为绝热压缩, 外界对工质做功使内能增加。

5. 多变过程

气体实际进行的过程既非等温过程, 也非绝热过程, 往往可以用多方过程表示:

$$PV^n = \text{常数}$$

式中: n 为任意常数, 称为多变指数, 上述方程式称为多变过程方程式。

上述四种典型的热力过程仅是多变过程的特例。

当 $n = 0$ 时, $PV^0 = P = \text{常数}$, 是等压过程;

当 $n = 1$ 时, $PV^1 = PV = \text{常数}$, 为等温过程;

当 $n = k$ 时, $PV^k = \text{常数}$, 为绝热过程;

当 $n = \infty$ 时, $V = \text{常数}$, 为等容过程。



PV^n 等于常数可以概括许多热力过程, 当 n 为任一定值时, PV^n 就代表了一个特定的过程。

多变过程在 $p-v$ 图中的位置如图 1-10。

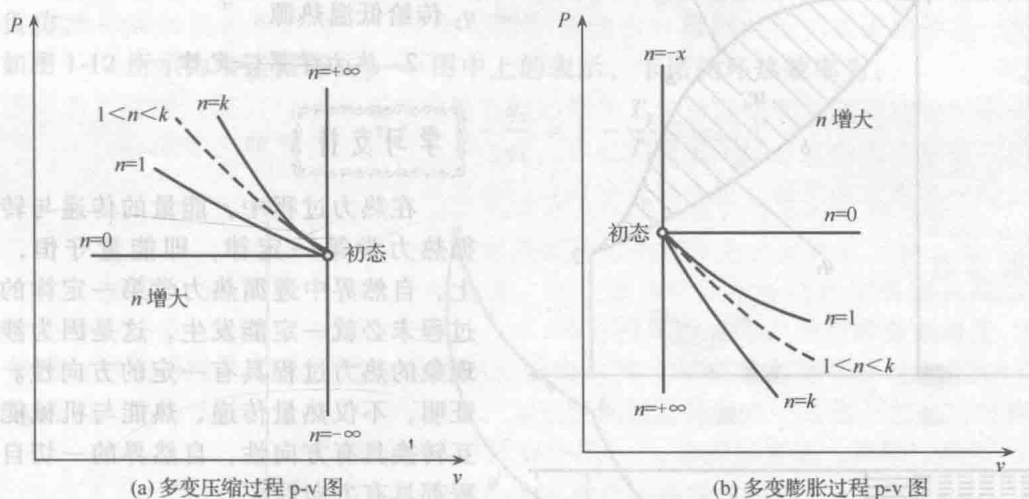


图 1-10 多变过程在 $p-v$ 图上的位置

四、热力学第二定律

原理描述

1. 热力循环

热变功的根本途径是依靠工质的膨胀。在工质的热力状态变化过程中, 通过工质的体积膨胀可以将热能转化为机械能而做功。但是任何一个热力膨胀过程都不可能一直进行下去, 而且连续不断地做功。因为工质的状态将会变化到不适宜继续膨胀做功的情况, 因此必须通过外界使其压缩再回到初始状态。

在热力循环中, 工质由初始状态出发, 经历一系列状态变化后又回到初态, 以实现热能与机械能转换的封闭的热力过程称为热力循环, 简称循环。

循环有正向循环和逆向循环。

热能转化为机械功的循环称为正向循环, 如汽车发动机的工作循环。消耗外界机械功将热量从低温物体传递到高温物体的循环称为逆向循环, 如空调的循环。

如图 1-11, 设 1kg 工质的进行一个正向循环, 由于气体由初始状态出发, 经历一系列状态变化后又回到初态, 因此它是一个封闭的曲线。

在 $p-v$ 图中, 膨胀线 $1-a-2$, 说明工质在膨胀过程中吸收了热量 q_1 , 并对外界做功; 在 $2-b-1$ 压缩过程中消耗机械功, 并对外界放出热量 q_2 ; 工质膨胀功大于压缩时消耗的功, 循环中工质做出净功 W_0 , 在 $p-v$ 图中, 封闭曲线 $1-a-2-b-1$ 所包围的面积即代表 W_0 的数值; 循环中工质从外界吸收的净热量为膨胀过程吸收热量 q_1 的绝对值与压缩过程向外界释放热量 q_2 的绝对值的差值, 即 $(q_1 - q_2)$ 。由于整个循环的内能不发生变化, 即 $\Delta U = 0$, 根据热力学第一定律可知:

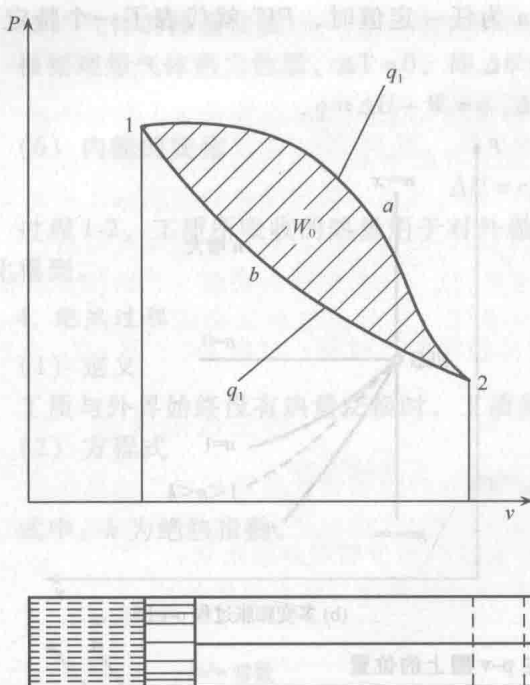


图 1-11 热力循环 p-v 图

热力学第二定律常用的两种表述方法如下。

其一，开尔文-普朗克表述：不可能从单一热源吸取热量使之完全转变为功而不产生其他影响。它是从热功转换的角度定义热力学第二定律的，是由英国人开尔文和普朗克于 1851 年、1897 年分别提出，因此将之称为开尔文-普朗克表述。

“不产生其他影响”是指除由单一热源吸热，并将所吸取的热用来作功以外的任何其他变化。也就是说：自然界中任何形式的能都可以变成热，而热却不能在产生其他影响的条件下完全变成其他形式的能。比如，蒸汽机等热机可以连续不断地将热变为机械功，但一定伴有热量的损失，即从单一热源不断地吸取热量而将它全部转换成机械功的第二类永动机是不可能制成的。

其二，德国物理学家克劳修斯表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。它是从热量传递的角度定义热力学第二定律的，是由德国物理学家克劳修斯于 1850 年提出，他指出热量可以自发地从较热物体传递至较冷物体，但不能自发地由较冷物体传递至较热物体，但要实现自发地由较冷物体传递至较热物体，就必须花费一定的代价。例如压缩制冷装置就是以消耗机械功为代价，以实现热从低温物体转移到高温物体。

所谓自发过程就是不需要任何外界作用而自动进行的过程。

热力学第二定律的以上两种表述，各自从不同的角度反映了热过程的方向性，实质是统一的、等效的。可概况为这样一个事实：一切自发的实现的过程都是不可逆的。热力学第二定律又可表述为：第二类永动机是不可能被成功制造的。

3. 卡诺循环

热力学第二定律指出，热机的循环热效率不可能达到 100%。那么，在一定的条件下，热效率可能达到的最高限是多少？法国工程师尼古拉·莱昂纳尔·萨迪·卡诺在 1824 年提出了最理想的循环方案，即著名的卡诺循环。

$$q_1 - q_2 = W_0$$

结论：工质在循环中吸收的热量 q_1 只有一部分转化为机械功 W_0 ，另一部分热量 q_2 传给低温热源。

2. 热力学第二定律

学习支持

在热力过程中，能量的传递与转换遵循热力学第一定律，即能量守恒，事实上，自然界中遵循热力学第一定律的热力过程未必就一定能够发生，这是因为涉及热现象的热力过程具有一定的方向性。实践证明，不仅热量传递、热能与机械能的相互转换具有方向性，自然界的一切自发过程都具有方向性。

揭示热力过程具有方向性这一普遍规律的是独立于热力学第一定律之外的热力学第二定律。



卡诺循环有两个可逆等温过程和两个可逆绝热过程组成，即：等温膨胀，在这个过程中系统从环境中吸收热量；绝热膨胀，在这个过程中系统对环境做功；等温压缩，在这个过程中系统向环境中放出热量；绝热压缩，系统恢复原来状态，在这个过程中系统对环境做负功。

如图 1-12 所示为卡诺循环在 $p-v$ 图上的表示，卡诺循环热效率为：

$$\eta_{tk} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

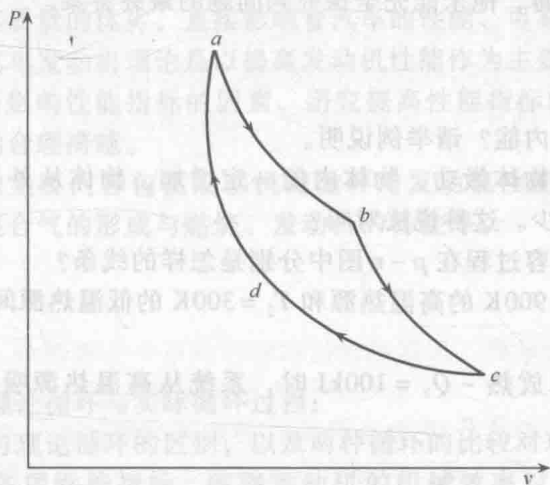


图 1-12 卡诺循环在 $p-v$ 图上的表示

原理分析

四个过程分析如下。

(1) 过程 ($a \rightarrow b$) 等温膨胀：工质由状态 a 在等温下从恒温高温热源吸收热量 q_1 ，变化到状态 b 。

(2) 过程 ($b \rightarrow c$) 绝热膨胀：工质由状态 b 进行绝热膨胀到状态 c ，此时温度由 T_1 降到 T_2 。

(3) 过程 ($c \rightarrow d$) 等温压缩：工质由状态 c 等温压缩，并向恒温低温热源放出热量 q_2 ，而达到 d 。

(4) 过程 ($d \rightarrow a$) 绝热压缩：工质由状态 d 通过绝热压缩回复到状态 a ，此时温度由 T_2 上升到 T_1 ，完成一个循环如下几点。

由以上四个过程的理想循环分析可知：

(1) 卡诺循环的热效率仅决定高温热源和低温热源的温度，与工质无关。提高 T_1 及降低 T_2 ，可提高卡诺循环的热效率。

(2) 卡诺循环的热效率总是小于 1，由于 T_1 不可能无限大， T_2 不可能为零，所以卡诺循环的热效率不可能达到 1。

(3) 提高循环的热效率的途径有，一是提高热源 T_1 ，二是降低冷温的温度 T_2 。

(4) 当 $T_1 = T_2$ 时，循环的热效率为零，即不可能有单一循环做功，这就是说，在温度平衡系统中不可能将热能转化为机械能，或者说借单热源作功的机器是不可能的。