

热 工 基 础

(一)

工程热力学篇

清华大学热能工程系
热工教研组

一九九九年八月

目 录

主要符号表	(4)
概论	(8)
第一章 基本概念	(10)
§ 1-1 热力系统	(10)
§ 1-2 平衡状态及状态参数	(11)
§ 1-3 状态方程与状态参数坐标图	(15)
§ 1-4 准静态过程与可逆过程	(15)
§ 1-5 功量与热量	(17)
思考题	
习题	
第二章 热力学第一定律	(23)
§ 2-1 热力学第一定律及其在闭口系统的应用	(23)
§ 2-2 稳定流动能量方程式	(25)
§ 2-3 稳定流动能量方程的应用	(30)
思考题	
习题	
第三章 理想气体的性质与热力过程	(37)
§ 3-1 理想气体状态方程式	(37)
§ 3-2 理想气体的比热容、热力学能、焓和熵	(41)
§ 3-3 理想混合气体	(49)
§ 3-4 理想气体的基本热力过程	(56)
§ 3-5 多变过程	(64)
§ 3-6 气体在喷管中的流动	(70)

§ 3-7	绝热滞止	(73)
-------	------------	------

思考题

习题

第四章	热力学第二定律	(81)
-----	---------------	------

§ 4-1	自发过程的方向性与热力学第二定律的表述	(81)
-------	---------------------------	------

§ 4-2	卡诺循环与卡诺定理	(82)
-------	-----------------	------

§ 4-3	熵	(87)
-------	---------	------

§ 4-4	焓	(95)
-------	---------	------

思考题

习题

第五章	水蒸气与湿空气	(103)
-----	---------------	-------

§ 5-1	水蒸气的基本知识	(103)
-------	----------------	-------

§ 5-2	水蒸气的产生过程	(105)
-------	----------------	-------

§ 5-3	水蒸气状态的确定	(108)
-------	----------------	-------

§ 5-4	水蒸气的基本热力过程	(111)
-------	------------------	-------

§ 5-5	湿空气的性质	(116)
-------	--------------	-------

§ 5-6	干—湿球温度计	(122)
-------	---------------	-------

§ 5-7	湿空气的焓——湿图	(123)
-------	-----------------	-------

§ 5-8	湿空气的基本热力过程	(126)
-------	------------------	-------

思考题

习题

第六章	动力装置循环	(132)
-----	--------------	-------

§ 6-1	蒸汽动力装置循环	(132)
-------	----------------	-------

§ 6-2 活塞式内燃机循环 (149)

§ 6-3 燃气轮机装置的理想循环 (160)

思考题

习题

第七章 气体的压缩和制冷原理..... (165)

§ 7-1 单级活塞式压气机的压气过程..... (165)

§ 7-2 气体和蒸气的绝热节流..... (172)

§ 7-3 空气压缩制冷循环..... (174)

§ 7-4 蒸气压缩制冷循环..... (177)

§ 7-5 吸收式制冷循环..... (181)

§ 7-6 热泵..... (182)

思考题

习题

主要符号表

拉丁字母

A 面积

c 音速

c 质量比热容、流速

c' 容积热容

C_m 摩尔热容

d 含湿量、汽耗率

E 总能量

E_x 焓

$E_{x,Q}$ 热量焓

U 热力学能

e 比总能量

e_x 比焓

u 比热力学能

F 作用力

g 重力加速度

H 焓、高度

h 比焓、高度

I 作功能力损失

K 能量利用系数

M 摩尔质量

m 质量

q_m 质量流量

n 多变指数、摩尔数

P 功率

p 绝对压力

p_b 大气压力
 p_g 表压力
 p_v 真空度
 p_s 饱和压力
 Q 热量
 q 比热量
 R_g 气体常数
 R 摩尔气体常数
 r 潜热
 S 熵
 s 比熵
 T 热力学温度
 t 摄氏温度
 T_s 、 t_s 饱和温度
 $T_{d,}$ 、 t_d 露点温度
 t_w 湿球温度
 U 热力学能
 u 比热力学能
 V 体积
 V_M 摩尔体积
 V_h 活塞排量
 V_c 余隙容积
 v 比体积
 W 膨胀功
 W_{net} 循环净功
 W_s 轴功
 W_t 技术功

W_f	流动功
w	比膨胀功
w_s	比轴功
w_t	比技术功
w_f	比流动功
w_{net}	比循环净功
W_c	压气机所需的功
x	干度、位移
ω_i	混合物的质量分数
x_i	混合物的摩尔分数
z	标高

希腊字母

α	抽气量
β	增压比
ε	压缩比、制冷系数
ε'	供热系数
η_t	循环热效率
η_c	卡诺循环热效率
η_v	容积效率
γ	比热容比
κ	绝热指数
λ	定容增压比
μ_J	焦耳—汤姆逊系数
ρ	密度、定压预胀比
φ	相对湿度

角码符号

- a 湿空气中干空气的
- c 临界点的
- cr 临界流动状态下的
- f 流体的
- i 第 I 种组元的
- iso 孤立系的
- max 最大的
- mix 最小的
- n 多变的
- O 标准状态的、环境的
- p 定压的
- s 定熵的
- T 定温的
- v 定容的、水蒸气的
- x 湿蒸汽的
- *
- R 可逆的、回热的
- IR 不可逆的

概 论

人类在生产和日常生活中,需要各种形式的能量。自然能源的开发和利用是人类社会进步的起点,而能源开发和利用的程度又是社会生产发展的一个重要标志。

所谓能源,是指提供各种能量的物质资源。自然界以自然形态存在的、可资利用的能源称为一次能源,主要有风能、水力能、太阳能、地热能、化学能和核能等。由一次能源加工转换的能源称为二次能源,其中主要是热能,机械能和电能。因此,能量和利用过程,实质上是能量的传递和转换过程。

在能量转换过程中,热能不仅是最常见的形式,而且具有特殊重要的作用。一次能源中除太阳能通过光电反应、化学能通过燃料电池直接提供电能以及风力、水力能直接提供机械能外、其余能源都往往转换成热能的形式。据统计,经过热能形式被利用的能量,在我国占 90 % 以上,世界其它各国平均超过 85 %。因此,热能的合理利用对于人类社会的发展有着重要意义。

热能的利用,有以下两种基本方式:一种是热利用,即将热能直接用于加热物体,以满足烘干、采暖、熔炼等需要。这种方式的利用可追溯到几千年以前。另一种是动力利用,通常是指通过各种热能动力装置将热能转换成机械能或者再转换成电能加以利用,为人类的日常生活和工农业及交通运输提供动力。自从 18 世纪中叶发明蒸汽机以来,至今虽然只有 200 多年的历史,但却开创了热能动力利用的新纪元,使人类社会生产力和科学技术突飞猛进。由此可见热能动力利用的重要性。然而,热能通过各种热能动力装置转换为机械能有效利用程度较低。早期蒸汽机的热效率只有 1 %—2 %。目前,燃气轮机装置的热效率大约只有 20 %—30 %,蒸汽电站的也只有 40 % 左右。如何更有效地实现热能转换,是一个十分迫切而又重要的课题。尽管我国解放以来能源生产发展迅速,已成为世界第三能源大国,而且燃料资源比较丰富,但按人口占有量来说并不富足,特别是我国目前利用热能的技术水平,与世界上发达国家相比,还有很大差距。为了更加有效、更加经济地利用热能,促进国民经济的发展,需要掌握有关能量转换规律方面的知识,而工程热力学正是有关研究热能及其转换规律的一门学科,不仅对于热能动力工程专业来说,是一门十分重要的专业基础课,而且对于其它专业的工程技术人员来说,也是其工程师素质必须具备的重要基础知识。

工程热力学是热力学的一个分支,是热力学理论在工程上的具体应用。工程热力学的主要研究对象是热能和机械能相互转换的规律。

因为热能和机械能的相互转换是通过工质在热工设备中的循环状态变化过程来实现的,所以热能与机械能转换所必须遵循的基本规律——热力学第一定律和第二定律是工程热力学的理论基础,工质的热力性质、热力过程和热力循环以及提高能量转换经济性的途径和技术措施,是工程热力学的主要研究内容。随着工业生产和科学技术的发展,工程热

力学的研究范围逐步延伸到燃烧化学、溶液、低温超导、高能激光、海水淡化、以及气象、生物等各个领域。

工程热力学采用经典热力学的宏观研究方法，它以热力学第一定律和热力学第二定律作为分析和推理的基础，对宏观的热力过程进行研究，不涉及物质分子、原子的微观行为，不需要对物质的微观结构进行任何假设，因此，分析推理的结果具有可靠性和普遍性。

此外，工程热力学还普遍采用抽象、概括、理想化和简化处理方法，突出实际现象的本质和主要矛盾，忽略细节和次要因素，建立合理简化的物理模型，集中反映客观事物的本质。

通过书本工程热力学篇的学习，不仅能使读者掌握工程热力学的基本概念、基本定律、基本热力过程和循环的分析计算方法以及常用工质热物理性质，树立节约能源、合理用能的观念，还能使读者了解工程热力学的辩证唯物主义的研究方法，有助于培养、树立辩证唯物主义的世界观和方法论。

第一章 基本概念

§ 1-1 热力系统

凡是能将热能转换为机械能的机器统称为**热力发动机**，简称**热机**。例如：蒸汽机，蒸汽轮机（也称蒸汽透平）、燃气轮机（也称燃气透平）、内燃机（汽油机、柴油机等）和喷气发动机皆为热机。

热能和机械能之间的转换是通过一种媒介物质在热机中的一系列状态变化过程来实现的，这种媒介物质称为**工质**。例如：空气、燃气、水蒸气、氨蒸气等都是常用的工质。

工程热力学中，把质量很大、在吸收或放出有限量热量时自身温度及其它热力学参数都没有明显改变的物体称为**热源**。

在工程热力学中，通常选取一定的工质或空间作为研究的对象，称之为**热力系统**，简称**系统**。系统以外的物体称为**外界或环境**。系统与外界之间的分界面称为**边界**。边界可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是移动的。本文用虚线表示热力系统的边界。

如图 1—1 所示，如果取气缸中的气体作为研究对象，则气缸内壁和活塞内表面即构成该系统的真实边界，并且一部分边界随活塞移动。

系统通过边界与外界发生相互作用，进行物质和能量交换。按照系统与外界之间相互作用的具体情况，系统可分为以下几类：

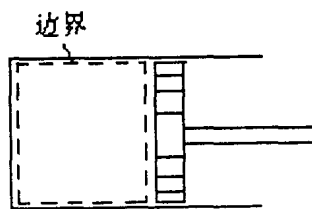


图 1—1

(1) **闭口系统**：系统与外界无物质交换。如图 1—1 所示，当工质进出气缸的阀门关闭时，气缸内的工质就是闭口系统。由于系统的质量始终保持恒定，所以也常称为**定质量系统**。

(2) **开口系统**：系统与外界有物质交换，如图 1—2 所示。运行中的汽轮机就可视为开口系统，在运行过程中，有蒸汽不断地流进流出。由于开口系统是一个划定的空间范围，所以开口系统又称**控制容积**。

(3) **绝热系统**：系统与外界无热量交换。

(4) **孤立系统**：系统与外界既无能量

(功、热量) 交换又无物质交换。

严格地讲，自然界中不存在完全绝热的或孤立的系统，但工程上却存在着接近于绝热或孤立的系统，用工程观点来处理问题时，只要抓住事物的本质，突出主要因素，就可以将这样的系统看成是绝热系统或孤立系统，同样可得出有指导意义的结论。

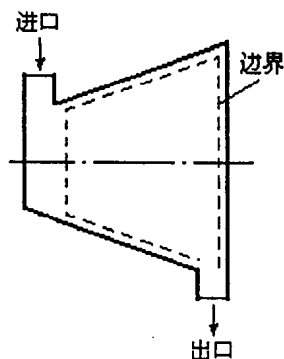


图 1-2

需要指出的是，选取的热力系统必须具有足够大的尺度，即和物质的微观尺度相比可以认为是无穷大，以满足宏观的假定。

§ 1-2 平衡状态及状态参数

1. 平衡状态

工质在膨胀做功或被压缩的过程中，它的压力、温度、体积等物理量会发生变化，或者说工质本身的状况会发生变化。工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的**热力学状态**，简称**状态**。

在没有外界影响的条件下⁽¹⁾，工质（或系统）的宏观性质不随时间而变化的状态称为**平衡状态**。当系统各部分的温度和压力不一致时，各部分间将存在着能量的传递和相对位移，其状态将随时间而变化，这种状态称为**非平衡状态**。非平衡状态如果没有外界的影响，最后将过渡到平衡状态。

用于描述工质平衡状态的物理量称为**状态参数**。例如：温度、压力、比体积等。状态参数具有点函数的性质，工质的平衡状态一旦确定，状态参数就具有确定的数值，与到达此状态的过程无关。如果工质处于非平衡态，其状态参数就难以确定，这时可以把系统分成许多小部分，每一部分可以近似认为是处于平衡状态。

2. 基本状态参数

(1) 这里的“外界影响”是指系统与外界之间能量或物质的交换，不是指恒定的外场（如重力场）的作用。

在工程热力学中，常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓、熵等，其中压力、温度、比体积可以直接测量，称为**基本状态参数**。

1) 压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为**压力**（即压强），用符号 p 表示，根据分子运动论，气体的压力是大量分子与容器壁面碰撞作用力的统计平均值。

$$p = \frac{F}{A}$$

式中， F 为垂直作用于面积 A 上的力。

在国际单位制中，力的单位为 1 N （牛顿），面积的单位为 m^2 ，压力的单位为 Pa ，称为**帕斯卡**，简称**帕**， $1\text{ Pa} = 1\text{ N/m}^2$ 。工程上因帕斯卡单位太小，常采用 kPa （千帕）和 MPa （兆帕）以及 bar （巴）来作为压力的单位。它们之间的关系为：

$$1\text{ MPa} = 10^3\text{ kPa} = 10^6\text{ Pa} \quad (1-1)$$

$$1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa} = 100\text{ kPa} = 0.1\text{ MPa}$$

压力的大小也可以用液柱高度来表示，若液柱高度为 h ，则此液柱作用在底面积上的压力为：

$$p = \rho gh \quad (1-2)$$

式中， ρ 为液体密度， g 为重力加速度。

对于选定的液体（通常是水或水银）， ρ 可视为常数，于是，压力与液柱的高度成正比。因此，可用液柱的高度代表压力的大小，或者说，可以用单位液柱高度作为压力的单位。由式(1-2)可得 1 mm 高的汞柱和 1 mm 高的水柱所代表的压力分别为：

$$1\text{ mmHg} = 133.3224\text{ Pa} \approx 133.3\text{ Pa}$$

$$1\text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{ Pa} \approx 9.81\text{ Pa}$$

$$1\text{ bar} = 750.06\text{ mmHg} = 1.01972 \times 10^4\text{ mmH}_2\text{O}$$

物理学中，将纬度 45° 海平面上的年平均气压称为**标准大气压**（物理大气压），也作为压力的一种单位，用 atm 表示，和其它压力单位之间关系为

$$1\text{ atm} = 760\text{ mmHg} = 101325\text{ Pa} = 1.01325\text{ bar}$$

在工程单位制中，用工程大气压（ at ）作为压力的单位。

$$1\text{ at} = 1\text{ kgf/cm}^2 = 735.56\text{ mmHg} = 9.80665 \times 10^4\text{ Pa}$$

工程上常用弹簧管式压力表和测量微小压力的 U 形管压力表测量工质的压力。由于压力表本身总处在某种环境（通常是大气环境）中，因此，由压力表测得的压力所代表的是被测工质的压力与当地环境压力之间的差值。是一个相对值，并非工质的真实压力。

工质的真实压力称为**绝对压力**，用 p 表示。当绝对压力高于大气压力 p_b 时，压力表指示的数值称为**表压力**，用 p_g 表示，如图 1—3a 所示。显然

$$p = p_b + p_g \quad (1-3)$$

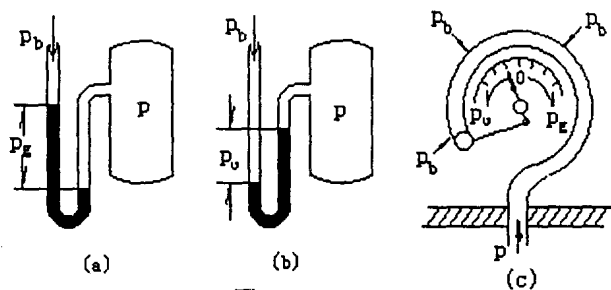


图 1—3

当工质的绝对压力低于大气压力时，如图 1—3b 所示，测压仪表指示的读数称为**真空度**。以 p_v 表示，此时：

$$p = p_b - p_v \quad (1-4)$$

大气压力随测量时间、地点而不同，可用大气压力计测定。工程计算中，如被测工质的压力很高，可将大气压力视为常数。一般近似地取为 0.1 MPa。如被测工质的压力较低，则须按当时当地大气压力的具体数值计算。总之，即使绝对压力不变，由于大气压力变化，表压力和真空度也会变化。只有绝对压力才能表征工质所处的状态，才是状态参数。

例题 1-1 容器中的真空度为 600 mmHg，而气压计上测得当时当地的大气压力为 755 mmHg，求容器中的绝对压力为多少 bar？如容器中的绝对压力不变，而气压计上的读数变为 770 mmHg 间此时真空表上的读数是多少 mmHg？

解：

$$p_b = 755 \times 133.3 \times 10^{-5} = 1.006 \text{ bar}$$

$$p_v = 600 \times 133.3 \times 10^{-5} = 0.80 \text{ bar}$$

因为容器中气体的压力小于大气压力，所以容器的绝对压力为：

$$p = p_b - p_v = 1.006 - 0.80 = 0.206 \text{ bar}$$

若容器内的绝对压力不变，而大气压力变为 770 mmHg，则真空表上的读数 p_v' 为：

$$\begin{aligned} p_v' &= 770 - 0.2066 \times 10^5 / 133.3 \\ &= 615 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

2) 温度

温度是标志物体冷热程度的物理量。根据气体分子运动论，气体的温度是组成气体的大量分子平均移动动能的量度。温度越高，分子不规则热运动越剧烈。

当两个温度不同的物体相互接触时，它们之间将发生热量传递，如果不受其它物体影响；那么，经过足够长的时间后，它们将达到相同的温度而不再进行热量传递，这种情况称为热平衡。这个事实导致热力学第零定律的建立。热力学第零定律表述为：如果两个物体中的每一个都分别与第三个物体处于热平衡，则这两个物体彼此也必处于热平衡。这第三个物体可用作温度计。温度概念的建立以及温度测量都是以第零定律为依据的，当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计所指示的温度就等于被测物体温度。

温度的数值表示法称为温标。国际单位制采用热力学温标为基本温标。用这种温标确定的温度称为热力学温度，以符号 T 表示，单位为 K（开尔文）。热力学温标取水的三相点（纯水的固、液、汽三相平衡共存的状态点）为基准点，并定义其温度为 273.16 K。因此，1 K 等于水的三相点热力学温度的 273.16 分之一。

热力学温标是一种理论温标，通常用气体温度计复现，但气体温度计装置复杂，使用不便，实用上采用国际实用温标。现在新采用的是 1990 年国际计量大会通过的国际温标（ITS-90）。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标，简称摄氏温标。用这种温标确定的温度称为摄氏温度，以符号 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ，并定义为

$$t = T - 273.15 \quad (1-5)$$

由此可知，摄氏温标与热力学温标仅起点不同。摄氏温度 0°C 相当于热力学温度 273.15 K。显然，水的三相点温度是 0.01°C 。

3) 比体积、密度

单位质量的工质所占有的体积为比体积，用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。如果质量为 $m \text{ kg}$ 的工质占有的体积为 $V \text{ m}^3$ ，则工质的比体积为：

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-6)$$

单位体积工质的质量称为密度。用符号 ρ 表示。单位为 kg/m^3 。很明显，比体积与密度互为倒数，即

$$\rho v = 1 \quad (1-7)$$

比体积和密度都是说明工质在某一状态下分子疏密程度的物理量，其中任一个都可以作为工质的状态参数，二者互不独立，通常以比体积作为状态参数。

§ 1-3 状态方程与状态参数坐标图

热力系统的平衡状态可以用状态参数来描述。状态参数有多个，它们各自从不同的角度描写了系统某一宏观特性，并且互有联系，因此，确定系统的状态不需要已知所有的状态参数。状态公理指出，对于简单的可压缩系统，只需两个独立的参数，便可确定它的平衡状态。例如：工质的基本状态参数 p 、 v 、 T ，只要其中任意两个确定，另一个也随之确定。可以表示为：

$$p = f(v, T)$$

或表示成隐函数形式：

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-8)$$

这种表示状态参数之间关系的方程式称为**状态方程式**。

由于两个独立的参数就可以确定系统的状态，所以，在以两个独立参数为坐标的平面坐标图上，每一点都代表系统的一个平衡状态。如图 1—4 中 1、2 两点分别代表由独立参数 p_1 、 v_1 和 p_2 、 v_2 所确定的两个平衡状态。显然，非平衡状态无法在图中表示，因其没有确定的状态参数。

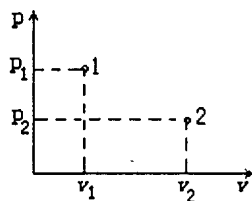


图 1—4

§ 1-4 准静态过程和可逆过程

1. 准静态过程

系统由一个状态经过一系列状态到达另一个状态的变化过程称为**热力过程**，简称**过程**。状态改变就意味着系统原平衡态被破坏。实际热工设备中进行的过程都是由于系统内部各处温度、压力或密度的不平衡而引起的，所以过程所经历的中间状态是不平衡的，并且很复杂。

为了便于对实际过程进行分析和研究，假设过程中系统所经历的每一个状态都无限地接近平衡态，这种过程称为**准平衡过程**，又叫作**准静态过程**。在状态参数坐标图上可以用连续的实线表示。而非平衡过程由于它所经历的不平衡状态没有确定的状态参数，因而不能表示在状态参数坐标图上。

既要使系统的状态发生变化，又要随时接近平衡态，只有使过程进行得无限缓慢方有可能实现。实际过程都是在有限的速度和时间内进行的，都是不平衡过程。在没有外界作用下，虽然一个系统从非平衡态达到完全平衡态需要很长时间，但是从非平衡态趋近平衡态所需时间往往不很长，这段时间叫做弛豫时间。实际上，在系统内外的不平衡势（如压力差、温度差等）不是太大的情况下，就可以将实际过程近似地看作为准平衡过程。例如：活塞式热力机械中，活塞运动的速度一般在 10 m/s 以内，但气体的内部压力波的传播速度等于音速，通常每秒数百米，相对而言，活塞运动的速度就很慢，象这类情况，就可按准平衡过程处理。

2. 可逆过程

当系统完成了某一过程之后，再沿着原路逆行而回复到原来的状态，外界也随之回复到原来的状态，不留下任何变化，则这一过程称为可逆过程。否则就是不可逆过程。例如在图 1-5 所示的装置中，取气缸中的工质作为系统。开始系统处于平衡状态 1，随着系统从热源吸热，体积膨胀并对活塞做功，使飞轮转动，系统由初态 1 经历了一系列准平衡态变化到终态 2。如果此装置是一理想的机器，不存在摩擦损失，那么工质的膨胀功将以动能的形式全部储存于飞轮中。如果利用飞轮的动能推动活塞缓慢逆行，则系统将由状态 2 沿着原路径逆向被压缩回到初态 1，压缩过程所需要的功正好等于膨胀过程所做的功，与此同时，系统向热源放热，放热量与膨胀时的吸热量相等。于是，当系统回到原来的状态 1 时，机器和热源也都回到了原来的状态，或者说系统和外界全部恢复到原来的状态，未留下任何变化，这样的过程就是可逆过程。

不难想象，有摩擦（机械摩擦，工质内部的粘性摩擦等）的过程，是不可逆过程。因为在正向过程中，气体所作的膨胀功，有一部分由于摩擦变成了热；在逆向过程中，还要再消耗一部分功用于克服摩擦而变成热，所以，要使工质回到初态，外界必须提供更多的功，这样，工质虽然回到了初态，外界却发生了变化。

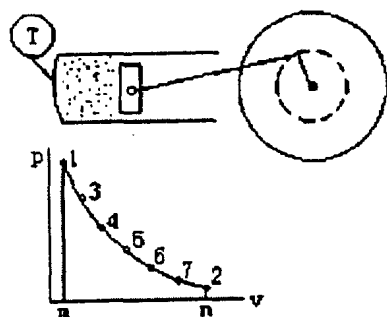


图 1-5

传热、混合、扩散、渗透、溶解、燃烧、电加热等实际过程都是不可逆过程。对于一个均匀的无化学反应的系统来说，实现可逆过程最重要的条件是：系统内部、系统与外界之间应满足热的和力的平衡条件，过程中不存在摩擦、粘性扰动、温差传热等消耗功或潜在作功能力的损失的耗散效应。所以可逆过程就是无耗散效应的准静态过程。