

热 学 基 础

(下 册)

王锡绂 王志兴 编

东 北 师 范 大 学

一九八二年元旦

基本物理常数

名 称	符 号	数 值	单 位 代 号	
			国 际	中 文
真空中光速	C	$2.997924580(12) \times 10^8$	m/s	米/秒
电子质量	m_e	$9.109534(47) \times 10^{-31}$	kg	千克
质子质量	m_p	$1.6726485(85) \times 10^{-27}$	kg	千克
中子质量	m_n	$1.6749543(86) \times 10^{-27}$	kg	千克
基本电荷	e	$1.6021892(46) \times 10^{-19}$	C	库
普朗克常数	h	$6.626176(36) \times 10^{-34}$	J · s	焦 · 秒
阿佛伽德罗常数	N_A	$6.022045(31) \times 10^{23}$	1/mol	1/摩
理想准气态 体态	{ 压 强 P_0 { 温 度 T_0 { 摩尔体积 V_m	101325	Pa	帕
		273.15	K	开
		$22.41383(70) \times 10^{-3}$	m^3/mol	米 ³ /摩
(摩尔)气体常数	R	8.31441(26)	J/(mol · K)	焦/(摩 · 开)
		8.20568×10^{-2}	atm · l/ (mol · K)	大气压 · 升/ (摩 · 开)
		1.98719	cal/(mol · K)	卡/(摩 · 开)
玻尔兹曼常数	$k(=R/N_A)$	$1.380662(44) \times 10^{-23}$	J/K	焦/开
万有引力常数	G	$6.6720(41) \times 10^{-11}$	$m^3 \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1}$	米 ³ · 秒 ⁻² · 千克 ⁻¹
绝对温标固定点		273.16	K	开
		0.01	°C	摄氏度

本表数据采自：中华人民共和国国家标准物理量符号(GB1434—78)1979.

热 学 基 础

目 录

* 第五章 热运动在技术科学中的应用

§ 33	蒸汽机	253
§ 34	内燃机	255
§ 35	致冷机	262
§ 36	热传递的基本方式	265
§ 37	热管	273
	小结 典型题例 思考题 习题 选作题

第六章 实际气体

§ 38	范得瓦耳斯方程	286
* § 39	实际气体的其它状态方程	297
§ 40	实际气体的内能	299
§ 41	焦耳—汤姆逊效应	301
* § 42	气体的液化	307
	小结 典型题例 思考题 习题 选作题

第七章 固体

§ 43	晶体与非晶体	319
§ 44	晶体的特性	321

* § 45	球的紧密堆积原则	330
* § 46	晶体的分类和化学键	335
* § 47	晶体形变的物理过程	341
§ 48	晶体中的热运动	345
	小结 典型题例 思考题 习题 选作题

第八章 液体

§ 56	液体的宏观性质与种类	359
§ 50	液体结构·近程有序性	361
§ 51	表面张力	364
* § 52	吸附	368
§ 53	接触角·润湿和不润湿	370
§ 54	表面压强·毛细现象	373
* § 55	弯月面上的饱和蒸气压强	377
	小结 典型题例 思考题 习题 选作题

第九章 相变和相平衡

§ 56	物质的相	387
§ 57	克拉拍龙—克劳修斯公式	390
§ 58	蒸发、沸腾和熔解	393
§ 59	临界点	399
§ 60	三相点	402
* § 61	晶态	405
	小结 典型题例 思考题 习题 选作题

*第十章 负绝对温度与热力学第三原理

§ 62	负绝对温度	416
------	-------	-----

§ 63	负绝对温度系统的热力学	418
§ 64	热力学第三原理	420
附录 1	水三相点瓶的构造与使用	428
附录 2	状态函数和完整微分	424
附录 3	$I_n = \int_0^{\infty} x e^{-x^2} dx$ 值	427
附录 4	误差函数	427
附录 5	理想气体公式 (可逆过程)	428
基本物理常数〔封 II〕		
常见物理量符号与单位 (SI 制)〔封 III〕		
主要参考书目		

*第五章 热运动在技术科学中的应用

热力学第一原理告诉我们，物质的各种运动形式可以相互转化，而能量在传递和转化过程中总值不变。热力学第二原理又告诉我们，机械能可以自发地转化热运动的能量，但在无外界影响的条件下，热运动能却不能完全转化为机械能，即热过程是有一定方向性的。这些基本规律，成为热运动在技术科学中应用的理论基础。

热运动在技术科学的应用主要有两方面：一是热运动的能量转化为机械能，实现这种转化的是各种热机（包括致冷机）；二是热运动形式没有改变，只是从一个物体传递到另一物体，这方面的基本规律构成了传热学。本章将着重研究这两方面应用的基本规律。

§ 33 蒸 汽 机

一、蒸汽动力装置的热效率

蒸汽机（或汽轮机）与锅炉等热力设备共同组成蒸汽动力装置。简单的蒸汽动力装置如图 33—1（a）所示，由锅炉、蒸汽机或汽轮机、凝结器和水泵等四个基本设备组成。

让我们观察一定质量的水在循环过程中体积、压强的变化，从而分析蒸汽机的动作原理。首先凝结器里水的压强略低于大气压、温度略低于正常沸点。水泵使凝结器中的水进

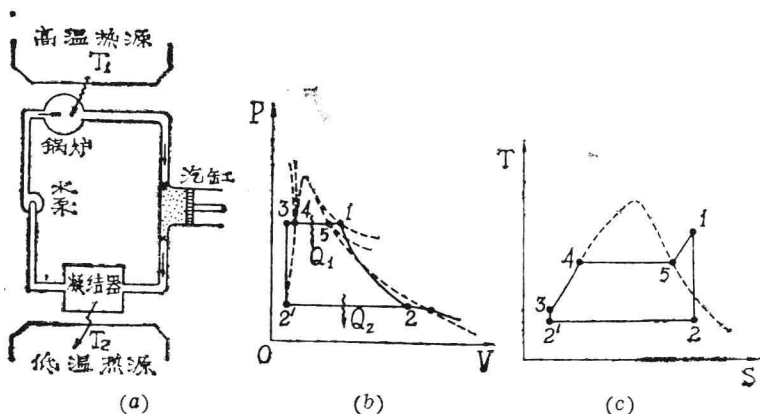


图 33—1 蒸汽动力装置与朗肯循环

入高温高压的锅炉中变成蒸汽。在压强基本不变的情况下蒸汽又变成过热蒸汽。过热蒸汽进入汽缸作绝热膨胀而对外做功，然后压强和温度降至与凝结器里的压强和温度基本相同。在那里蒸汽放热给低温热源而变成水，再开始新的循环。

蒸汽机的基本循环称为朗肯 (Rankine) 循环，如图 33—1 (b) 所示，它是由两个等压过程和一个绝热过程、一个等容过程构成：

1—2 为蒸汽绝热膨胀过程，在此过程中蒸汽机对外做功

2—2' 为废蒸汽等温等压凝结过程 (汽液共存)，在此过程中废蒸汽放出热量 Q_2 而变成水。定压放热 Q_2 [由 (8—13) 式] 为

$$-Q_2 = H_{2'} - H_2 \quad (33-1)$$

2'—3 为水作绝热压缩过程。在这过程中，温度只发生很小变化；水又极难压缩，因而体积也可认为未变；压强增至与锅炉中压强相同为止。

3—1 是等压吸热过程。其中 3—4 是水等压加热至沸点；4—5 是水等温等压汽化而变成饱和蒸汽（液汽共存）；5—1 为蒸汽等压过热而变成过热蒸汽。在 3—1 等压过程共吸热

$$Q_1 = H_1 - H_3. \quad (33-2)$$

依热力学第一原理，工质在一循环中内能未变，因此在循环中对外作的功为

$$W = Q_1 - Q_2 = H_1 - H_3 + H_2' - H_2.$$

在 2'、3 状态水经过水泵，**压强**、**体积**变化都不大，因此有 $H_2' \approx H_3$ ，故上式为

$$W = Q_1 - Q_2 \approx H_1 - H_2. \quad (33-3)$$

蒸汽机（或汽轮机）的热效率为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \approx \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_3} \approx \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_2'}. \quad (33-4)$$

上式表明，蒸汽动力装置的热效率取决于蒸汽的焓 H_1 、废蒸汽的焓 H_2 和凝结水的焓 H_2' 。而 H_1 取决于蒸汽的初状态参量 p_1 、 t_1 ； H_2 除与 p_1 、 t_1 有关外，还取决于废汽的末状态参量 p_2 ； H_2' 则取决于压强 p_2' （即 p_2 ）。这些焓值可由 $H-S$ 图或蒸汽表^①求得。

§ 34 内 燃 机

内燃机按燃烧方式可分点燃式和压燃式两种：汽油机为点燃式；柴油机为压燃式。如果按循环冲程分类，则有二冲程和四冲程内燃机。本节着重研究应用最为广泛的四冲程内

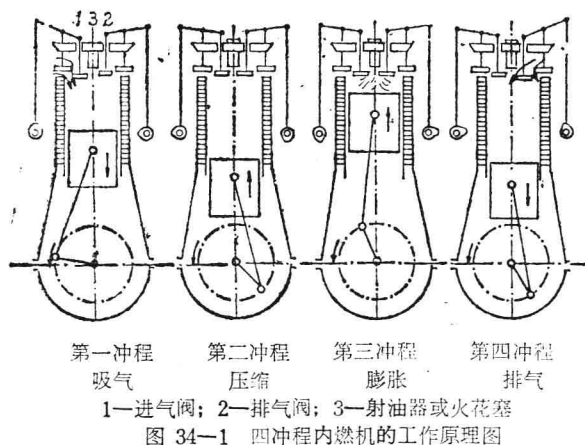
^① $H-S$ 图和蒸汽表可参阅 М.П.ВУКАЛОВИЧ, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА (1958).

中译本 1964 科学出版社。

燃机。

一、四冲程内燃机

四冲程内燃机的工作循环为进气、压缩、膨胀和排气等过程（图34—1）。



在第一冲程中，进气门打开，排气门关闭，活塞在曲轴带动下，从上向下移动，则气体（工质）被吸进气缸。这时缸内气体的压强略低于大气压强。第二冲程中，进气门也关闭，活塞在曲轴带动下向上移动，这时缸内气体被绝热压缩，其温度和压强都要升高。第三冲程是燃烧后的气体绝热膨胀，推动活塞做功（只有此冲程内燃机对外做功）。第四冲程中排气门打开，活塞在曲轴带动下上行，排出废气。

图34—2为四冲程内燃机的示功图。

点燃式内燃机（如汽油机）在进气冲程中（0—1）吸入予先混合好的可燃气体（如汽油气和空气的混合物），然后进行绝热压缩（1—2）。为了避免爆燃，压缩终点2的

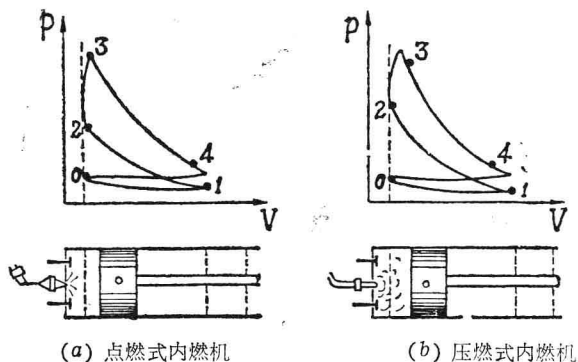


图 34—2 四冲程内燃机示功图

压强与温度不宜太高（表34—1），压缩终了由火花塞点火引燃。燃烧过程（2—3）进行得非常迅速，几乎是在活塞没离门上止点时造成压强急剧增高，通常看成是定容燃烧过程〔图34—2（a）的2—3过程线〕。燃烧的气体绝热膨胀（3—4）推动活塞做功。膨胀接近终了，排气门打开，排出废气（4—0）。压燃式内燃机（如柴油机）与点燃式内燃机的主要区别在于，进气冲程吸进的是空气，在压缩时空气可达很高的压强和温度，一般为500—700℃（柴油在30大气压下自燃点约为205℃），这时柴油由高压油泵喷入后即自行燃烧。由于喷入燃料需一定时间，燃料雾化、混合、升温至自燃等整个燃烧过程也需一定时间，因而可以认为是先定容、再定压下的混合燃烧过程〔图34—2（b）的2~3过程线〕

四冲程内燃机在曲转每两转中完成一次工作循环。由示功图可以看出，在活塞的四个冲程中，压缩和膨胀是两个主要工作冲程，而进气和排气则是两个辅助冲程。在这四个冲程中，只有膨胀冲程是气体作正功（即内燃机对外做功）其

四冲程内燃机气缸中气体压强和温度 表34—1

活塞位置	柴 油 机		汽 油 机	
	压 强 (10^5 帕)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	压 强 (10^5 帕)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
进气終了	0.8—0.9	5.0—7.0	0.8—0.9	70—100
压缩終了	35—40	500—700	5—9	230—300
膨胀 / 开始	50—60	1500—1800	20—30	2000—2500
作功 \ 終了	3—4	800—900	3—4	900—1300
排气終了	1.1—1.2	600—700	1.1—1.2	700—1000

余三个冲程则需外界对气体做功（即气体对外界作负功）。在计算内燃机做功时，要由正功的数值减掉负功的数值，这样算得的结果可以用示功图中的闭合曲线（1—2—3—4—1）面积代表。

二、内燃机的理论循环

在分析内燃机的热力循环时，一般要将实际的工作循环进行一系列的简化，从而得到理论循环。分析理论循环可以方便地探索提高循环热效率的途径。

通常将实际工作循环作如下假定：

(1) 不考虑气缸中工质数量的变化。
 (2) 不考虑气缸中工质发生的化学变化，把燃烧过程看成是从一系列高温热源吸热的过程。

(3) 循环过程都认为是理想的可逆过程。如压缩和膨胀过程都看成是理想的绝热过程。（这样看是完全可以的，因为在压缩和膨胀过程气体工质来不及向外传热——所谓过程进行得较迅速方面；而气体内部压强从不平衡到平衡的弛予时间比起活塞运动的时间更短——所谓过程进行得较为缓慢方面。两方面结合正是可逆的绝热过程）。排气过程则用定容放热过程代替。

(4) 不考虑实际过程中的其它损失(如摩擦等)。

根据内燃机气缸中工质燃烧过程的不同,理论循环可分为:定容吸热循环、定压吸热循环和混合吸热循环。

1. 定容吸热循环

定容吸热循环是汽油机的理论循环,也称奥托(Otto)循环,如图34-3所示。这个循环是由两条绝热线和两条等容线构成的。因此,有

$$Q_1 = \nu C_{V_m} (T_3 - T_2),$$

$$Q_2 = \nu C_{V_m} (T_4 - T_1).$$

则此循环的热效率为

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$$

考虑到1-2和3-4是绝热过程,所以

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}.$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}.$$

故有

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1}.$$

引入绝热压缩比

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}. \quad (34-1)$$

则得

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}. \quad (34-2)$$

由(34-2)式可见,定容吸热循环的热效率取决于绝热压

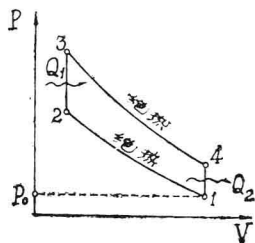


图 34-3 定容吸热循环

缩比，压缩比 ε 增加，热效率也将增大。但是，在汽油机中压缩比不能过大，否则将引起爆燃。从而产生强烈的金属敲击声，以致零件快速磨损甚至被烧坏。一般 ε 为 5 ~ 9（如解放牌汽车 ε 为 6）。

2. 定压吸热循环

定压吸热循环是由压缩空气喷油的老式柴油机的理论循环，也称狄赛尔 (*Diesel*) 循环，如图 34—4 所示。这个循环是由两条绝热线，一条等压线，一条等容线构成的。因此，有

$$Q_1 = \nu C_{p,m} (T_3 - T_2),$$

$$Q_2 = \nu C_{v,m} (T_4 - T_1).$$

则此循环的热效率为

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{C_{v,m}(T_3 - T_2)}{C_{p,m}(T_4 - T_1)} \\ &= 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1}. \end{aligned}$$

引入定压膨胀比

$$\rho = \frac{V_3}{V_2}. \quad (34-3)$$

和绝热膨胀比

$$\delta = \frac{V_1}{V_3}. \quad (34-4)$$

并考虑到 2—3 定压过程有

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \rho.$$

又 3—4 绝热膨胀过程有

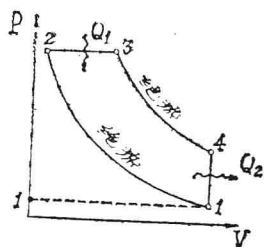


图 34—4 定压吸热循环

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_3} \right)^{\gamma-1} = \delta^{\gamma-1}.$$

和 1—2 绝热压缩过程有

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \varepsilon^{\gamma-1}.$$

则

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{\frac{T_3}{\delta^{\gamma-1}} - \frac{T_3}{\rho \varepsilon^{\gamma-1}}}{T_3 - \frac{T_3}{\rho}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\rho}} \cdot \frac{1}{\rho \varepsilon^{\gamma-1}}.$$

又因

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}. \quad (34-5)$$

所以

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\rho^{\gamma-1}}{\rho-1}.$$

最后得到

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\rho^{\gamma-1}}{\rho-1}. \quad (34-6)$$

由 (34-6) 式可见, 定压吸热循环的热效率取决于绝热压缩比和定压膨胀比。压缩比 ε 越大, 热效率越高; 膨胀比 ρ 越大, 热效率越低。在实际热机中, 由于材料强度的限制, 压缩比的提高也是有限度的。

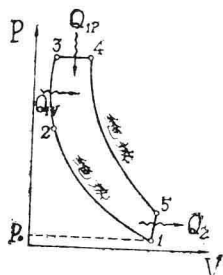


图 34-5 混合加热循环

* 3. 混合吸热循环

混合吸热循环是由高压油泵喷油的柴油机的理论循环, 也称萨巴德循环,

如图 34—5 所示。这个循环是由两条绝热线、一条等压线和两条等容线构成的，因此

$$Q_{1V} = \nu C_{Vm}(T_3 - T_2),$$

$$Q_{1p} = \nu C_{p m}(T_4 - T_3),$$

$$Q_2 = \nu C_{Vm}(T_5 - T_1),$$

则此循环的热效率为

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_{1V} + Q_{1p}}.$$

引入定容升压比

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} \quad (34-7)$$

并考虑到

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \cdot \varepsilon^{\gamma-1}, & T_3 &= T_2 \cdot \lambda, \\ T_4 &= T_3 \cdot \rho, & T_5 &= T_4 \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{\gamma-1} \end{aligned}$$

又
$$\frac{V_4}{V_5} = \frac{V_3}{V_5} \cdot \frac{V_4}{V_3} = \frac{\rho}{\varepsilon}.$$

则得

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^{\gamma-1}}{(\rho-1)\gamma\lambda + (\lambda-1)}. \quad (34-8)$$

由 (34—8) 式可见，混合吸热循环的热效率与 ε 、 λ 、 ρ 均有关。当 ε 增大时，热效率便增高。但是考虑到材料强度，现在一般柴油机的压缩比选用 $\varepsilon = 13 \sim 16$ ，特别的可达 20。如果令 λ 增大而 ρ 减少，热效率也可提高。当 $\rho = 1$ 时，(34—8) 式与定容吸热循环时热效率一样。当 $\lambda = 1$ 时，(34—8) 式与定压吸热循环时热效率一样。

§ 35 致 冷 机

致冷机可以认为是逆转的热机。热机是从高温热源吸收热量，其中一部分热量转化为功，而将其余部分热量放给低温热源。致冷机则如图 (35—1) 所示，是在压缩机输入机械功 W ，从低温热源吸收热量并将其放给高温热源。这样就使低温热源温度降低而制冷了。

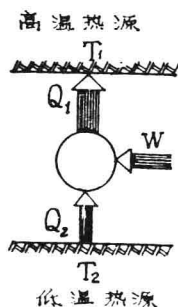


图 35—1 致冷机示意图

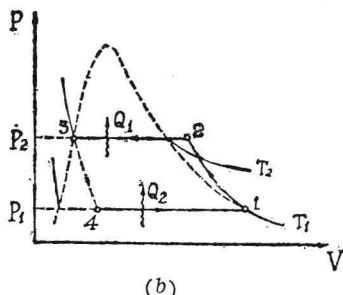
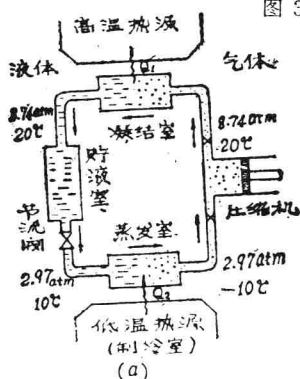


图 35—2 致冷机

图35—2 是实际致冷机(以氨为致冷剂)的流程 和其 PV 图, 它是由下列过程构成的:

1—2 气态致冷剂经压缩机绝热压缩, 温度和压强都升高, 达到 $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $p_2 = 8.74\text{atm}$, 流向凝结室。

2—3 气态致冷剂在凝结室作等温等压冷却并凝结, 这是液化过程。在此过程中它向高温热源(如 $10^\circ\text{C} \sim 15^\circ\text{C}$ 的冷却水)放热 Q_1 。

3—4 液态致冷剂经节流阀进行节流, 此时它的温度和压强都要降低, 可达到 $t_1 = -10^\circ\text{C}$, $p_1 = 2.97\text{atm}$ 。这是一

个非平衡过程，因此用点线表示。

4—1 致冷剂从低温热源（致冷室即冷库）吸收热量 Q_2 ，此时液态氨蒸发进行等温等压的汽化过程。-10℃的液态氨蒸发可使冷库冷却到 -5℃左右。然后致冷剂再进入压缩机，重复上述各流程。

评价致冷机好坏应用致冷系数，它的定义是

$$\omega = \frac{|Q_2|}{|W'|} = \frac{|Q_2|}{|Q_1| - |Q_2|} \quad (35-1)$$

式中 W' 为压缩机作的功； Q_2 为致冷剂从冷库吸取的热量； Q_1 为致冷剂向高温热源放出的热量。从 (35-1) 式可以看出，消耗压缩机的功愈少，而自冷库取出的热量愈多，则致冷系数愈大，即该致冷机愈好。

致冷系数可能比 1 大许多。如 $\omega = 5$ ，则

$$\frac{|Q_2|}{|W'|} = \frac{|Q_1| - |W'|}{|W'|} = 5, \text{ 即}$$

$$\frac{|Q_1|}{|W'|} = 6 \quad \text{或} \quad |Q_1| = 6|W'|.$$

由此可见，当致冷系数为 5 时，致冷机通过致冷剂向高温热源放出的热量六倍于压缩机的功。当然，这个过程不是自动进行的，是由压缩机做功的结果，所以致冷过程并不违反热力学第二原理。

作为一个例子，我们研究一下理想气体工质在可逆的卡诺逆循环中（图 35-3）的致冷系数。这里需强调一点，过程（或循环）的可逆性与逆向过程（或逆循环）不是一回事。过程的可逆性（§ 24）要求满足两点：过程足够缓慢；无耗散效应。而逆向过程只不过使过程反向进行而已。

依致冷系数的定义，用 $T-S$ 图可计算出可逆的逆向卡