

4.5、循环过程和卡诺过程

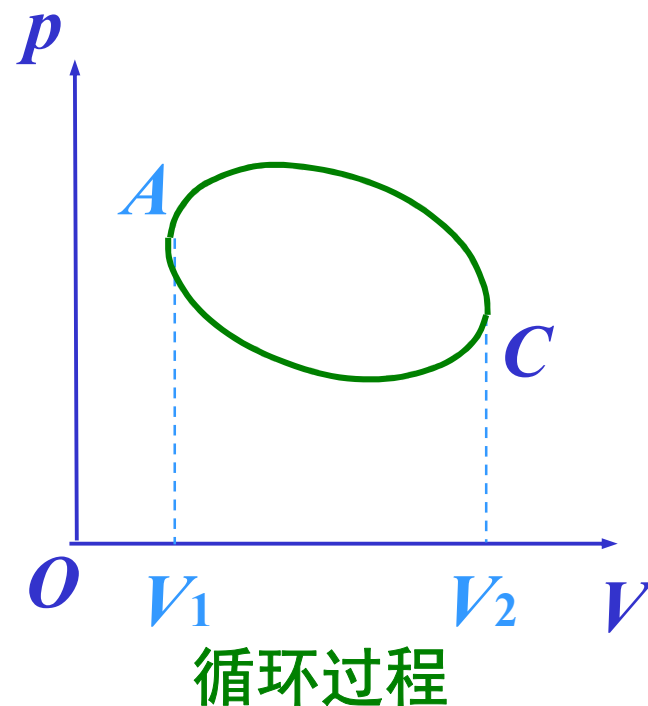
- 循环过程

系统由某个状态出发, 经过任意的一系列过程, 最后回到原来的初始状态的过程称为**循环过程**。

➤ 如果其循环过程是准静态的, 在图上表示为一条闭合曲线;

➤ **正循环**, 循环沿顺时针方向进行;

➤ **逆循环**, 循环沿逆时针方向进行。



循环过程：

➤ 内能的改变为0： $\Delta U = 0$

第一定律： $\Delta U = Q + W = Q - W' = 0$

正循环：---- 热机

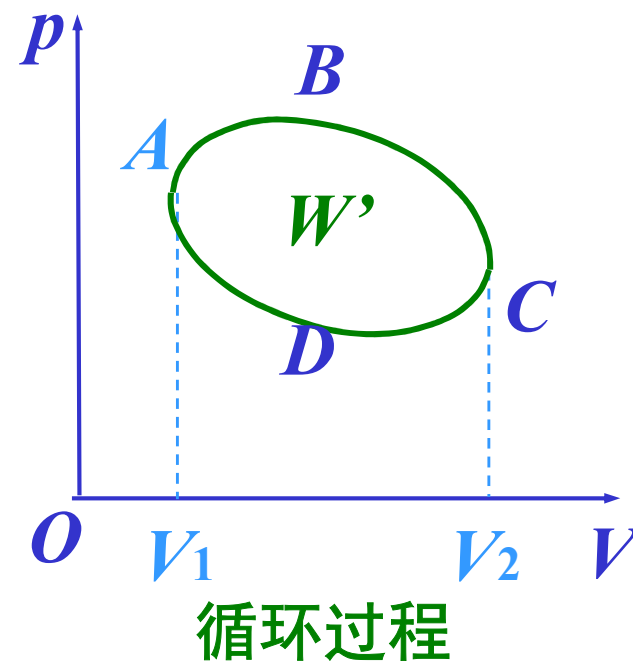
$W' > 0$ 系统对外界做功

$Q > 0$ 系统从外界吸热

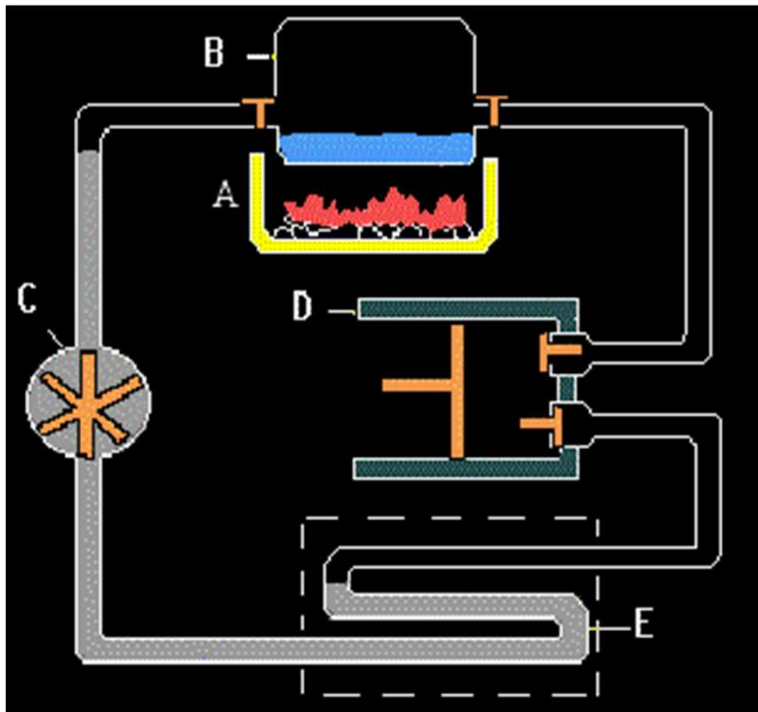
逆循环：---- 制冷机

$W' < 0$ 外界对系统做功

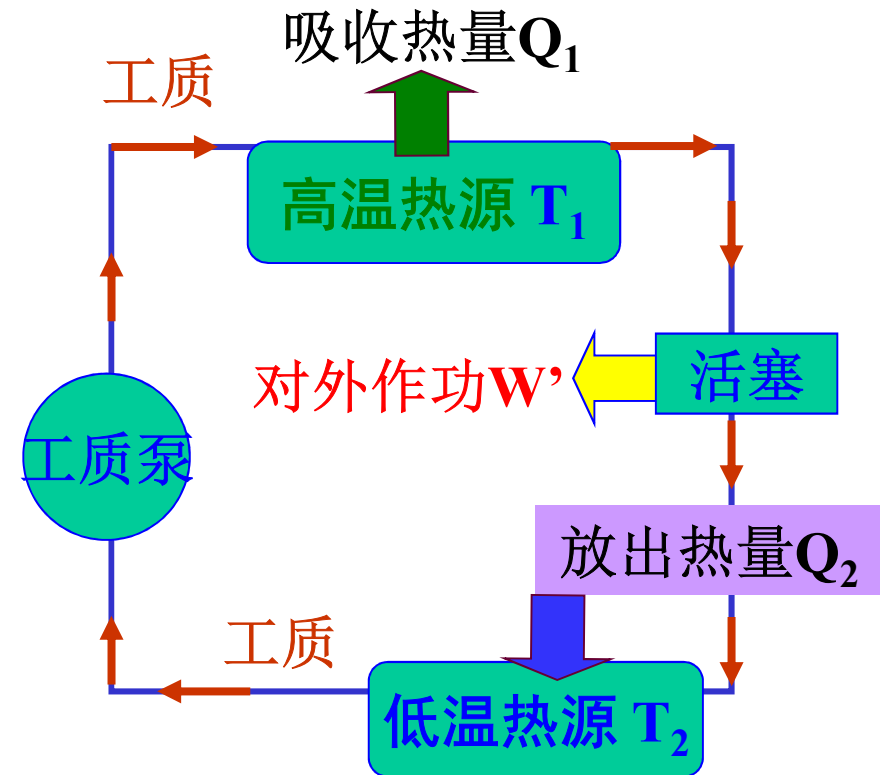
$Q < 0$ 系统向外界放热



正循环过程——热机

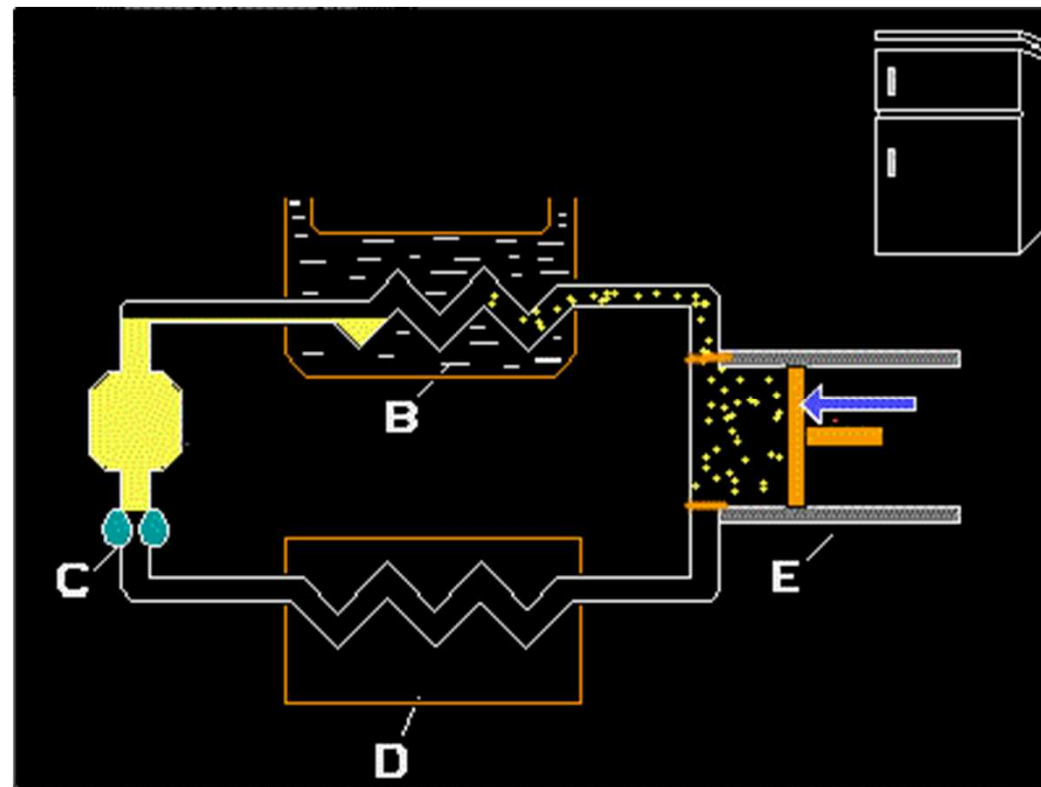


A:高温热源, B:锅炉
C: 泵, D: 气缸, E: 低温热源

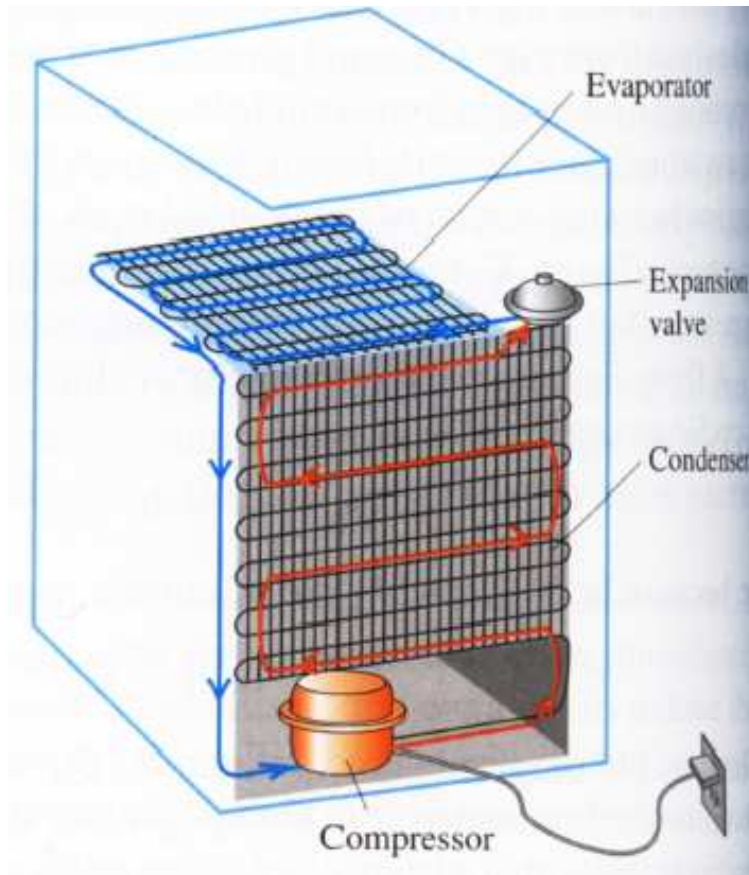


工质:吸收热量并对外做功的物质

逆循环过程——制冷机



逆循环过程——冰箱



- Compressor 压缩机
- Condensor 冷凝器
- Expansion valve 节流阀
- Evaporator 蒸发器

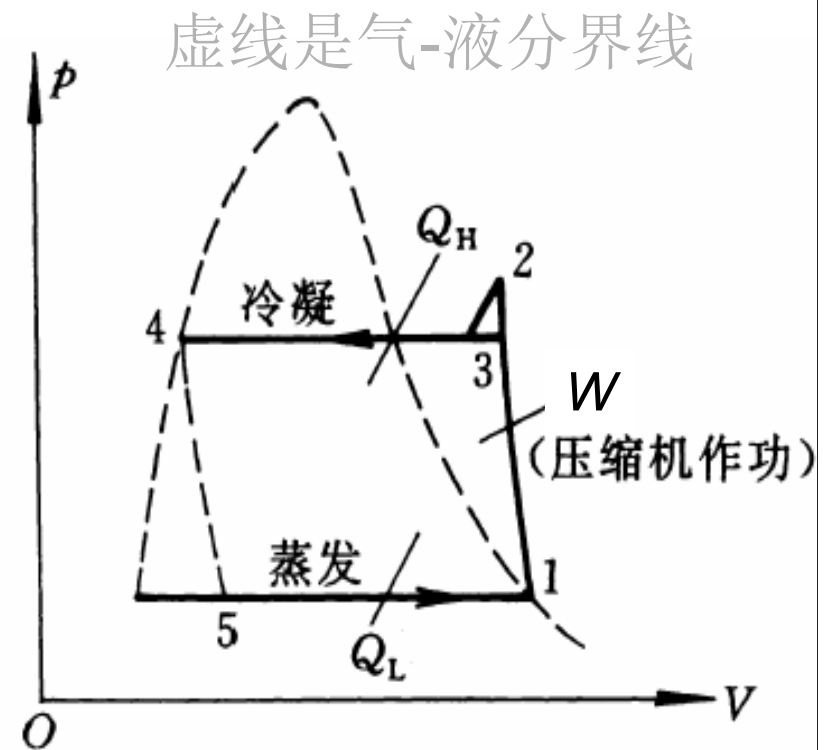
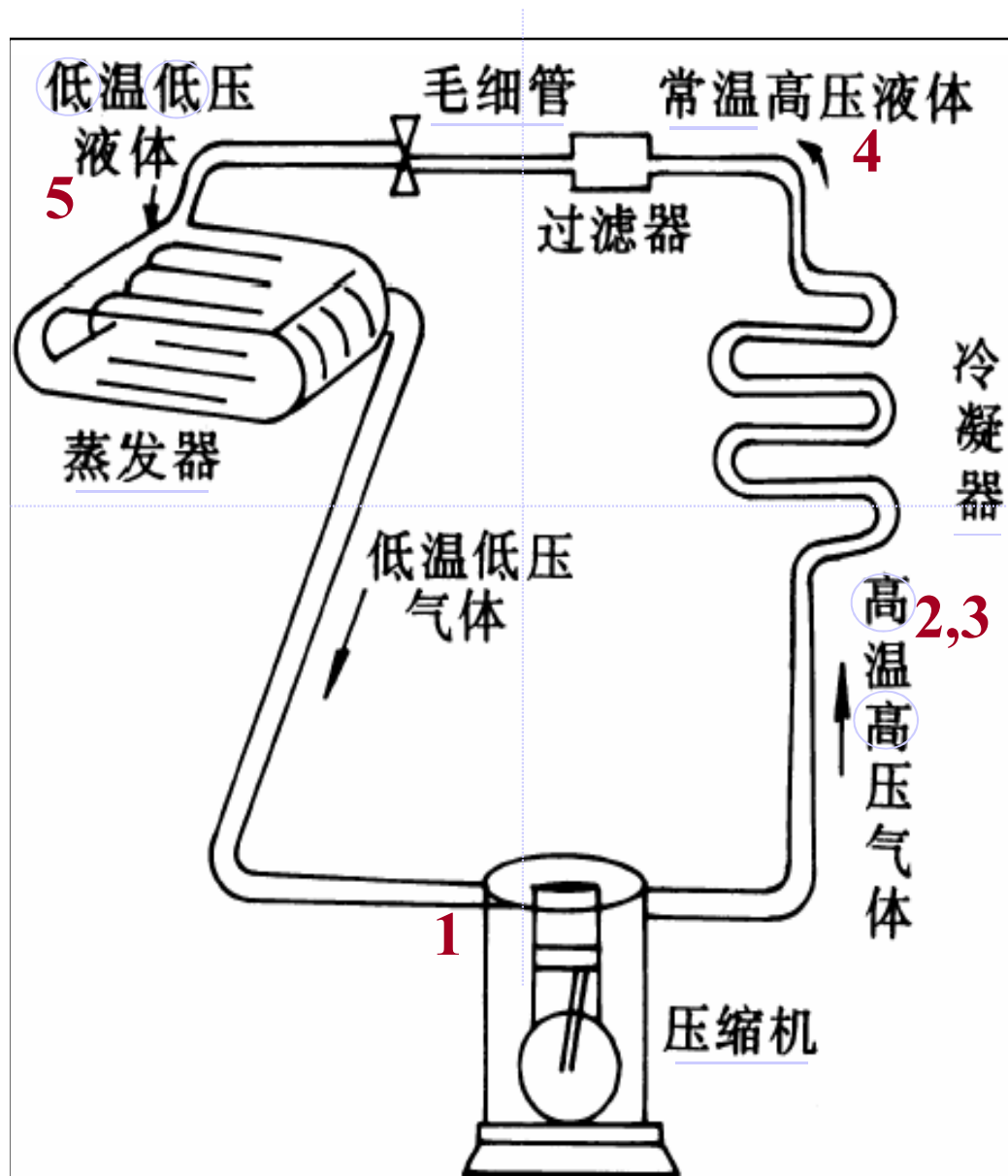
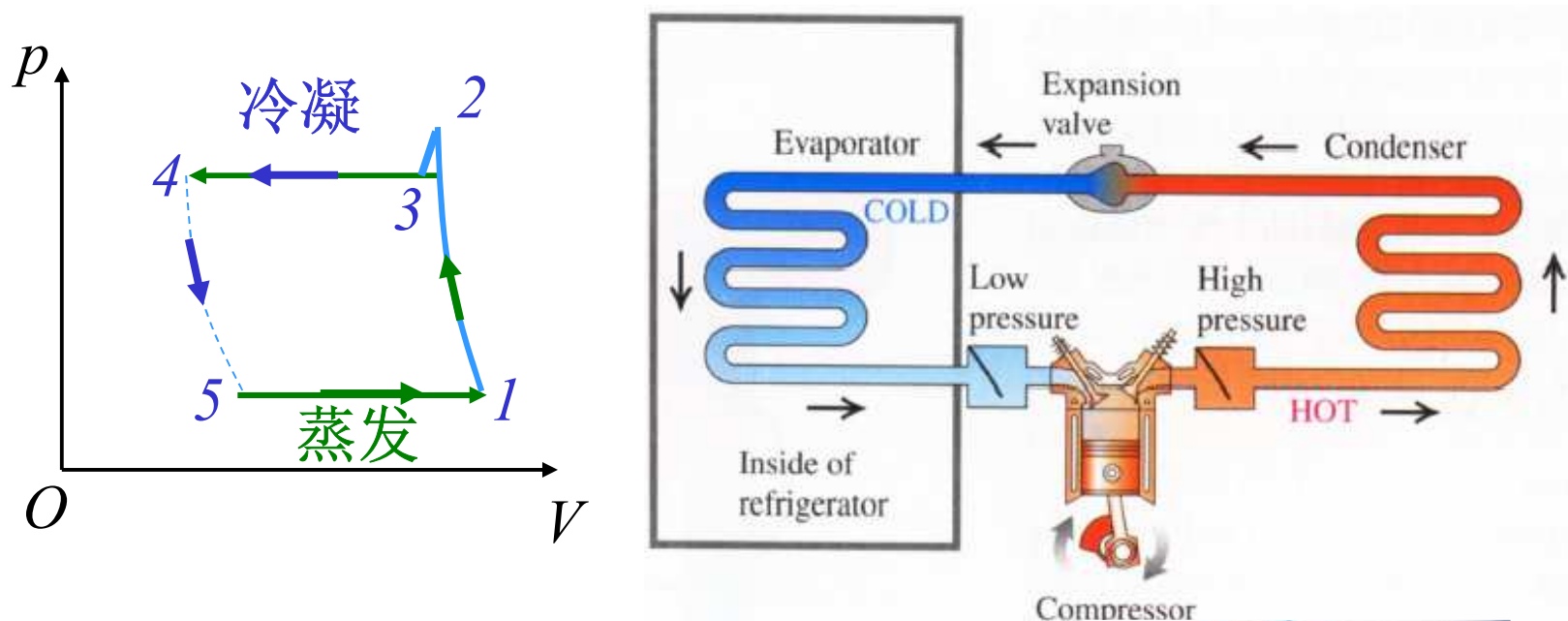


图4-11 电冰箱工作原理

蒸发致冷循环

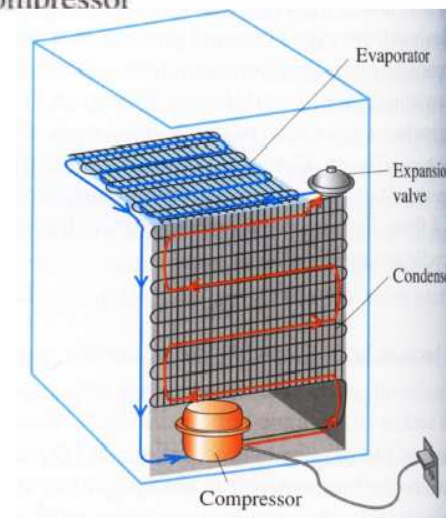
电冰箱原理图中

- 有4个主要器件：
毛细管产生低温低压液体，
压缩机产生高温高压气体；
蒸发器使液变气， 冷凝器使气变液
- 循环过程分为上下左右4部分：
上方是液体，下方是气体；
左方是低温(冷)，右方是高温(热)；
左方是低压，右方是高压

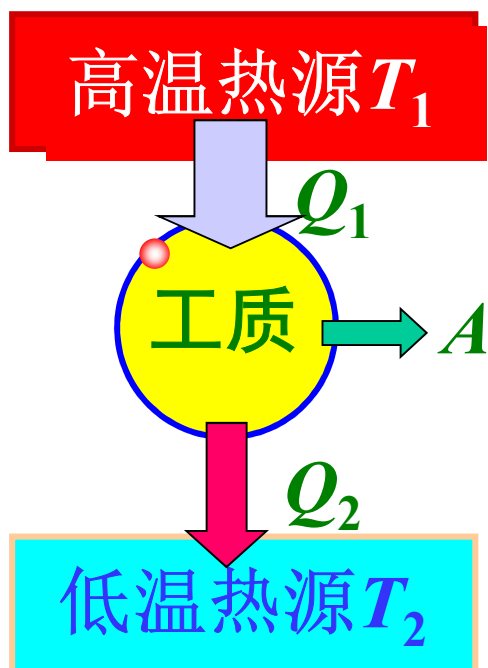


干燥氟里昂蒸气进入压缩机:

- 绝热压缩 后为高温高压过热蒸气 (1→2)
- 冷凝 后为常温高压液体 (2→3)
- 经节流阀后为低温低压液体 (3→4)
- 进入蒸发器, 液体汽化, 吸取汽化热 (4→1)

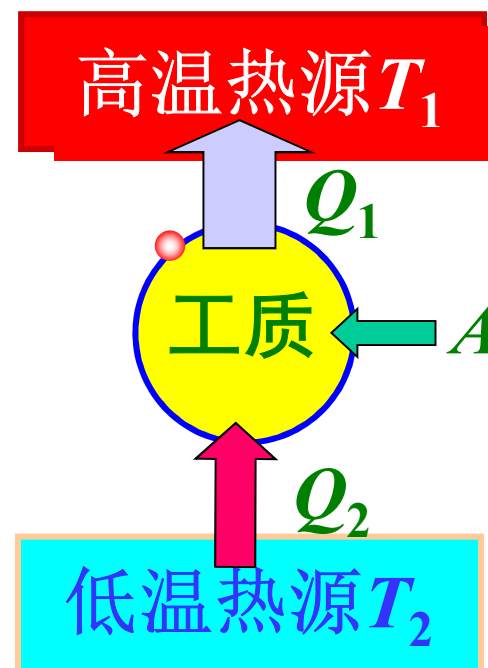


热机效率:



$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

致冷系数:



$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

历史回顾：

□ 1706 纽可门

制成第一台能供实用的蒸汽机

□ 1768 瓦特完善了蒸汽机

增加了冷凝器， 发明了活塞阀、飞轮、离心节速器等，使其成为真正的动力。 $\eta = 3-5\%$

□ 1824 卡诺

提出一种理想热机，并说明其效率最高。

萨迪·卡诺

法国工程师、热力学的创始人之一。兼有理论科学才能与实验科学才能，是第一个把热和动力联系起来的人，是热力学的真正的理论基础建立者。他出色地、创造性地用“理想实验”的思维方法，提出了最简单，但有重要理论意义的热机循环——卡诺循环，并假定该循环在准静态条件下是可逆的，与工质无关，创造了一部理想的热机（卡诺热机）。



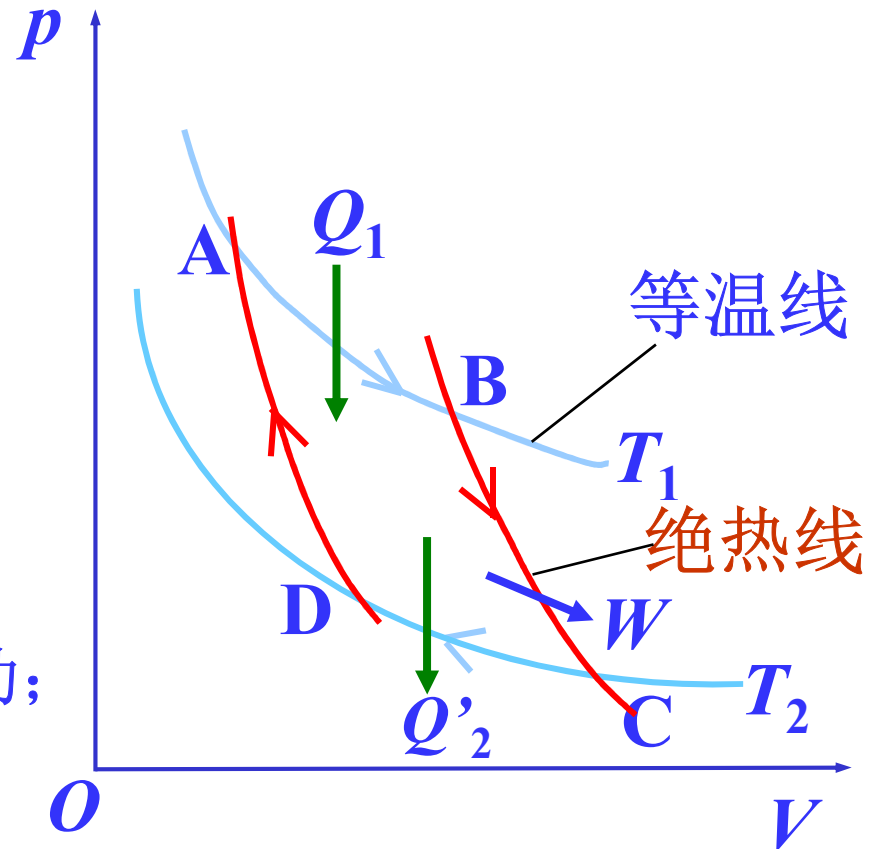
**Nicholas Léonard
Sadi Carnot
(1796 – 1832)**

卡诺循环

由两个等温过程和两个绝热过程组成的循环称为卡诺循环。

四个过程

- AB:** 等温膨胀，吸热；
- BC:** 绝热膨胀，对外界做功；
- CD:** 等温压缩，放热；
- DA:** 绝热压缩，外界对系统做功。



卡诺循环的效率

- 正卡诺循环

吸热:

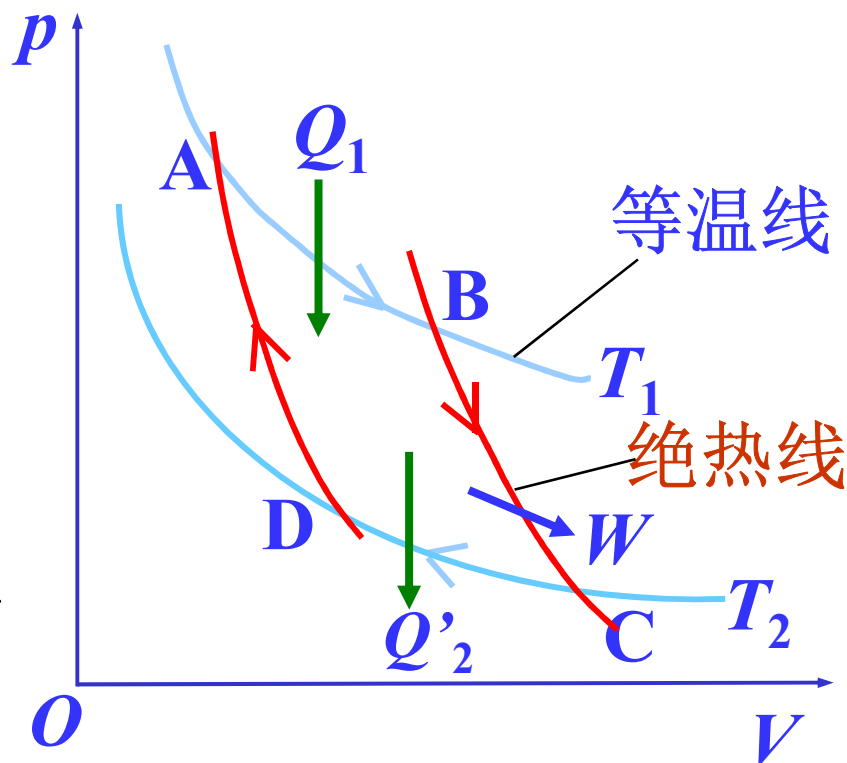
$$Q_1 = Q_{AB} = \nu RT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}$$

放热:

$$Q_2' = -Q_{CD} = \nu RT_2 \ln \frac{V_C}{V_D}$$

效率:

$$\eta = \frac{W'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} = \frac{T_1 \ln \frac{V_A}{V_B} - T_2 \ln \frac{V_C}{V_D}}{T_1 \ln \frac{V_A}{V_B}}$$



对**BC** 和 **DA** 两绝热过程，由绝热过程方程得

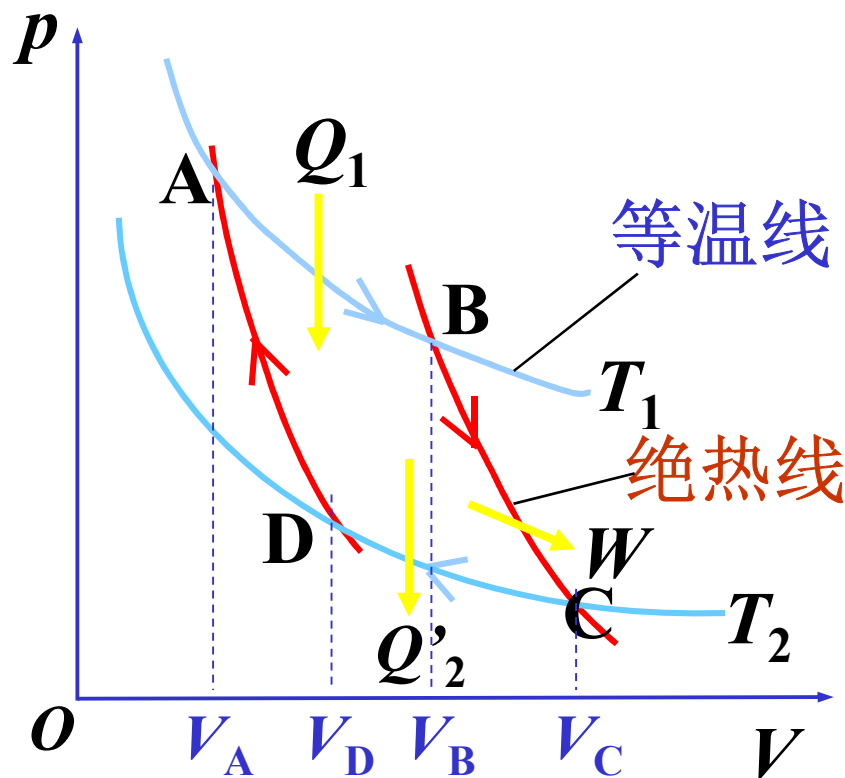
$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}, \quad T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1}$$

而 $T_A = T_B, T_D = T_C$ ，所以

$$\left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1}$$

$$\text{即 } \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

-----循环闭合条件



所以，卡诺循环的效率

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

理想卡诺循环的效率只与两个热源的温度有关。

高温热源温度越高，或低温热源温度越低，则效率越高

同理，逆卡诺循环的制冷系数

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

讨论

- 1) 卡诺热机效率 $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$
只与 T_1 和 T_2 有关
与物质种类、膨胀的体积无关

- 2) 理论指导作用

$$\text{提高 } \eta_c \quad \left\{ \begin{array}{l} T_1 \uparrow \\ T_2 \downarrow \end{array} \right.$$

提高高温热源的温度更现实。

3) 低温热源温度 $T_2 \neq 0$

说明热机效率 $\eta_c \neq 1$

且只能 $\eta_c < 1$

4) 热机循环不向低温热源放热是不可能的

热机循环至少需要两个热源。否则，海水降0.01°C，可供全世界1700年所需能量，就无能源危机了。

5) 疑问：由热力学第一定律，循环过程中如果

$$\eta = 1$$

相当于把吸收的热量全做功，

从能量转换看不违反热力学第一定律

但为什么实际做不到？

说明：必然还有一个独立于热一律的定律存在。

（热力学第二定律）

提高热机效率

- 从蒸汽机到内燃机：

四冲程压燃式柴油发动机，
其理想循环是定压加热循环。

（狄塞尔循环， **Diesel cycle**）



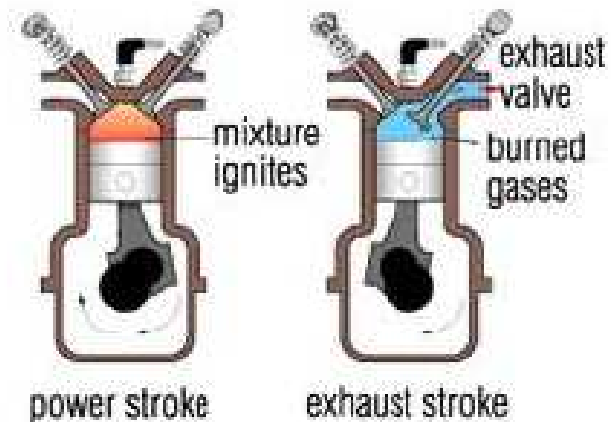
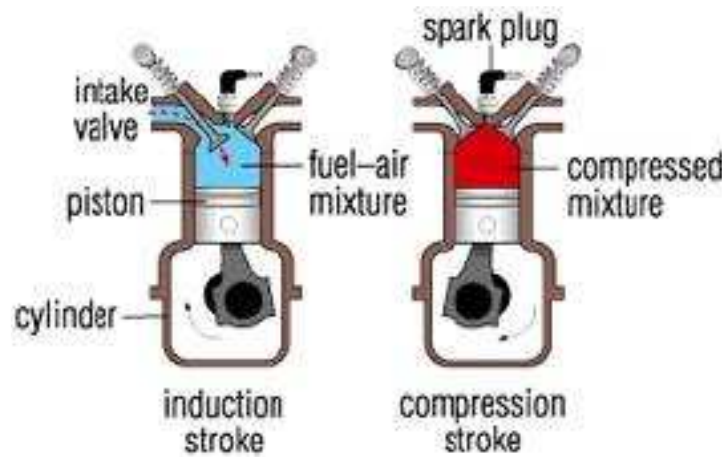
Rudolf Diesel
(1858-1913)



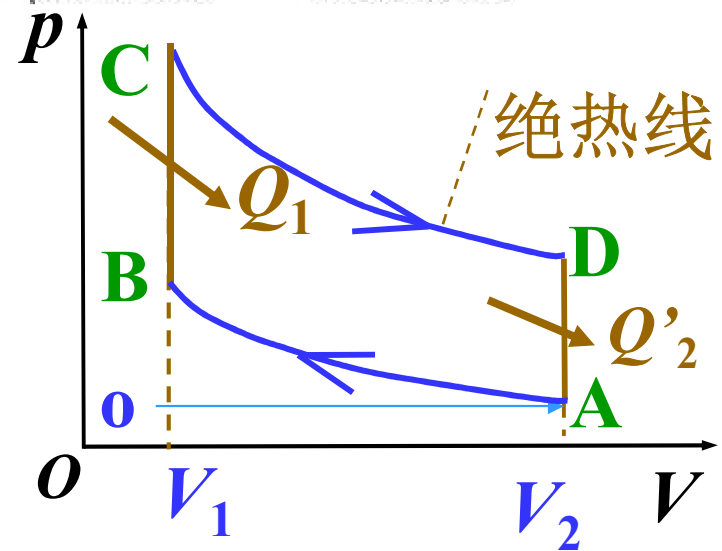
Nikolaus Otto
(1832-1891)

四冲程火花塞点燃式汽油发动机，其理想循环是
定体加热循环。（奥托循环， **Otto cycle, 1876**）

Otto Cycle



- 0-A: 等压进气 (汽油, 空气)
- A-B: 绝压 (绝热), 外界做功
- B-C: 点火爆炸 (等体吸热 Q_1)
- C-D: 绝推活塞做功 (绝热)
- D-A: 等体放热 Q_2
- A-O: 排气 ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$, 废气)



奥托循环（定体加热循环）

四冲程等效为理气的两个绝热过程和两个等体过程组成。

0-A: 等压进气（汽油，空气）

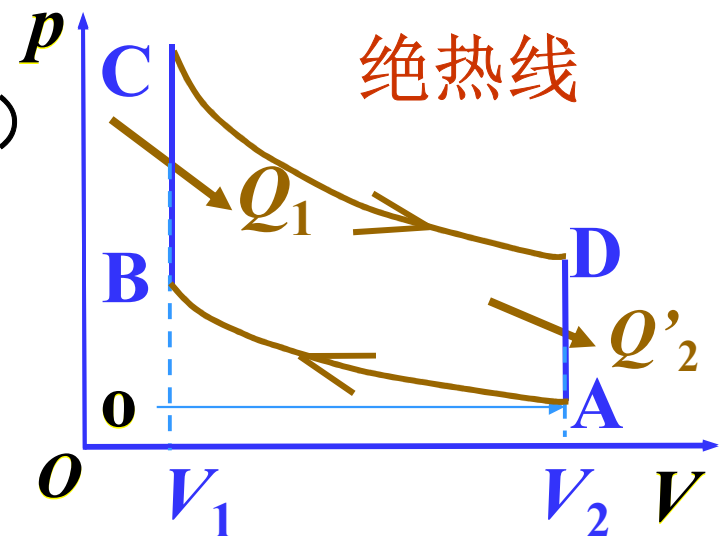
A-B: 速压（绝热），外界做功
（电机利用电瓶的电。无电则手工）

B-C: 点火爆炸（等体吸热 Q_1 ）

C-D: 速推活塞做功（绝热）
（有价值部分，同时充电于电瓶）

D-A: 等体放热 Q_2

A-0: 排气（ $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$, 废气）



效率：

$$\text{由： } T_c V_1^{\gamma-1} = T_d V_2^{\gamma-1} \quad T_b V_1^{\gamma-1} = T_a V_2^{\gamma-1}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\nu C_V (T_d - T_a)}{\nu C_V (T_c - T_b)}$$

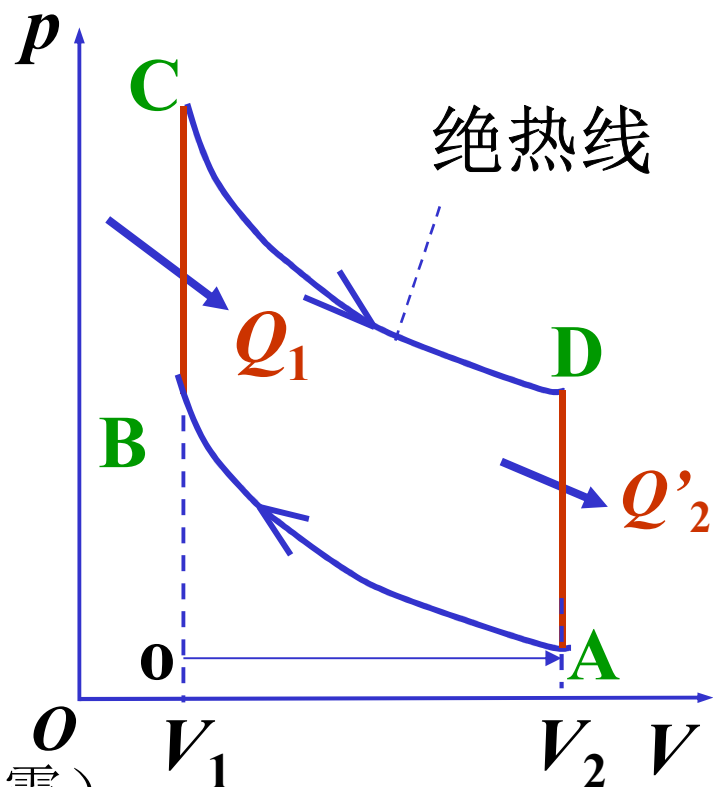
$$= 1 - \frac{T_d - T_a}{(T_d - T_a) \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}} = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

$\frac{V_2}{V_1}$ 为压缩比 \uparrow , $\rightarrow \eta \uparrow$ 。

但过高 (~ 10) 会提前点火 (爆震),

需加铅, 污染环境。

一般压缩比小于7, $\eta = 55\%$ 。 实际约为 25%.



现代热电厂：

$$T_1 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad T_2 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$$

(900K) (300K)

理论： $\eta \sim 65\%$

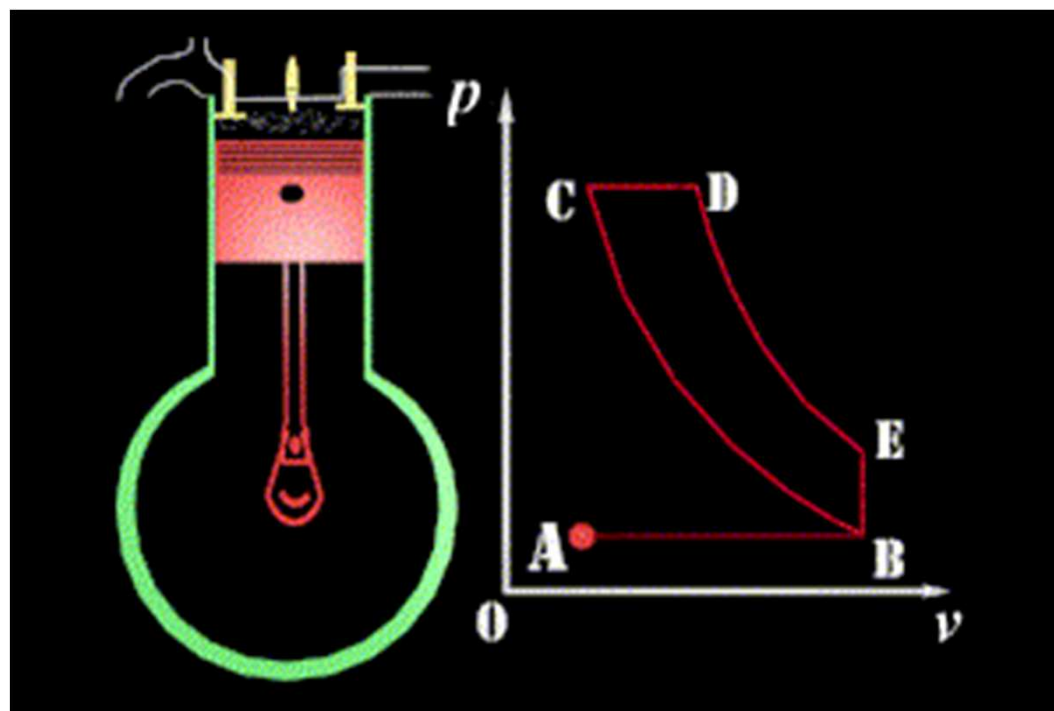
实际： $\eta < 40\%$

有损耗， T_1 不够高



狄塞尔循环（定压加热循环）

——四冲程柴油机工作循环。



四冲程等效为理气的两个
绝热过程和等体、等压过程各
一个。

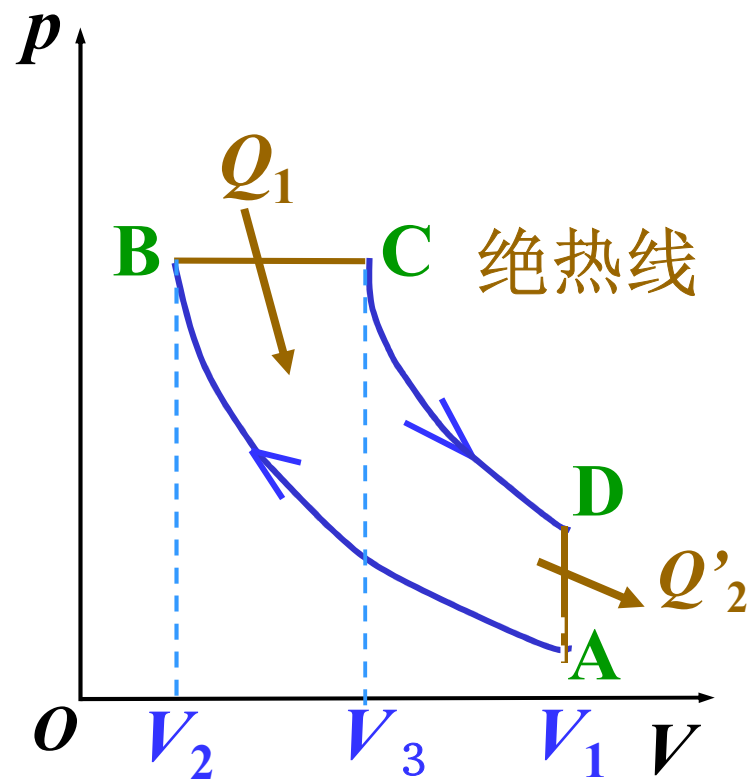
A-B: 绝热压缩

B-C: 等压吸热 Q_1

C-D: 绝热膨胀

D-A: 等体放热 Q'_2

求此循环效率。

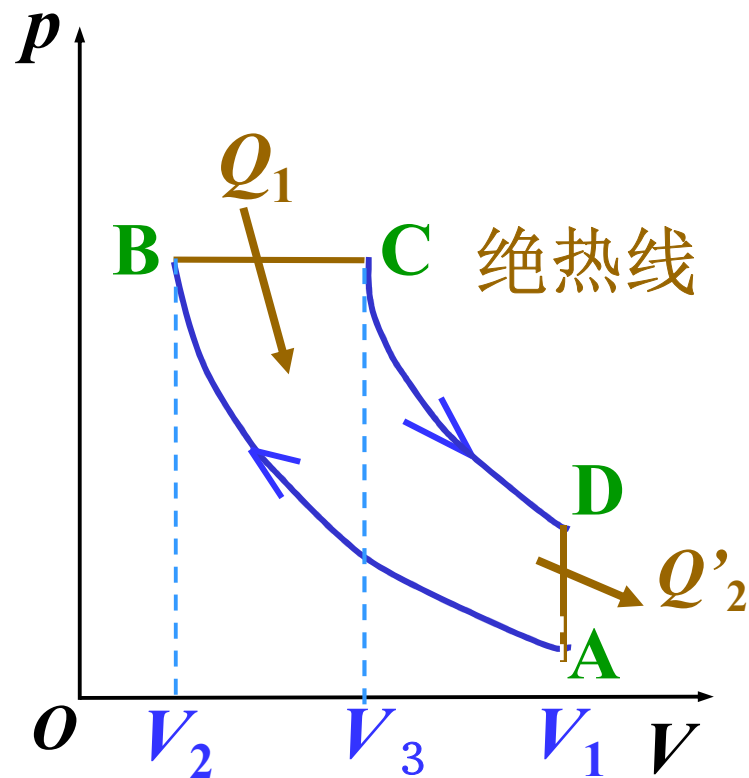


解：对等体、等压过程，有

$$Q_1 = C_P(T_C - T_B)$$

$$Q'_2 = C_V(T_D - T_A)$$

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \frac{Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{C_V(T_D - T_A)}{C_P(T_C - T_B)} \\ &= 1 - \frac{T_D - T_A}{\gamma(T_C - T_B)}\end{aligned}$$



对于两个绝热过程，有

$$\frac{T_B}{T_A} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}, \quad \frac{T_C}{T_D} = \left(\frac{V_1}{V_3} \right)^{\gamma-1}$$

引入：绝热压缩比

$$r = \frac{V_2}{V_1},$$

定压膨胀比

$$\rho = \frac{V_3}{V_2}$$

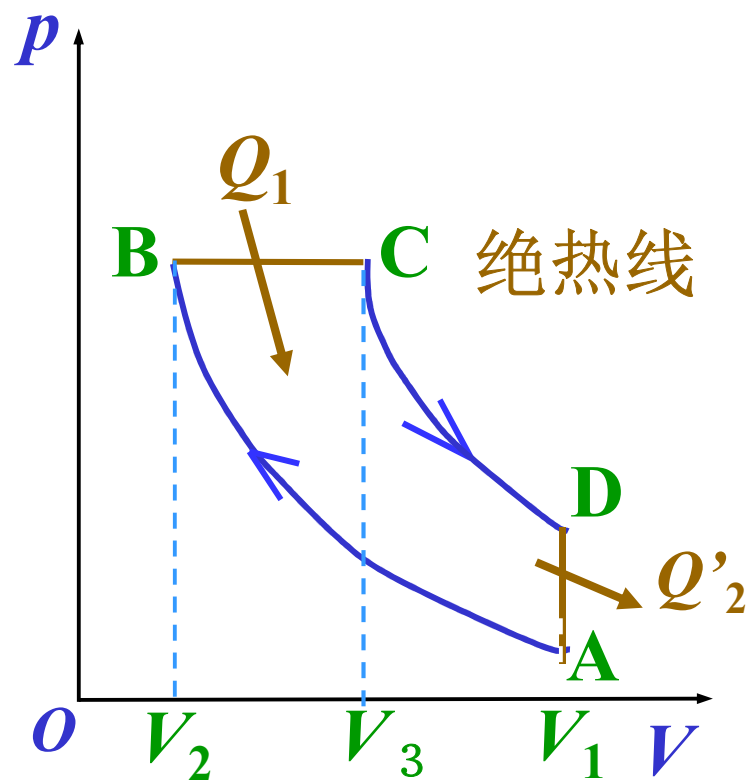
绝热膨胀比

$$\delta = \frac{V_1}{V_3}$$

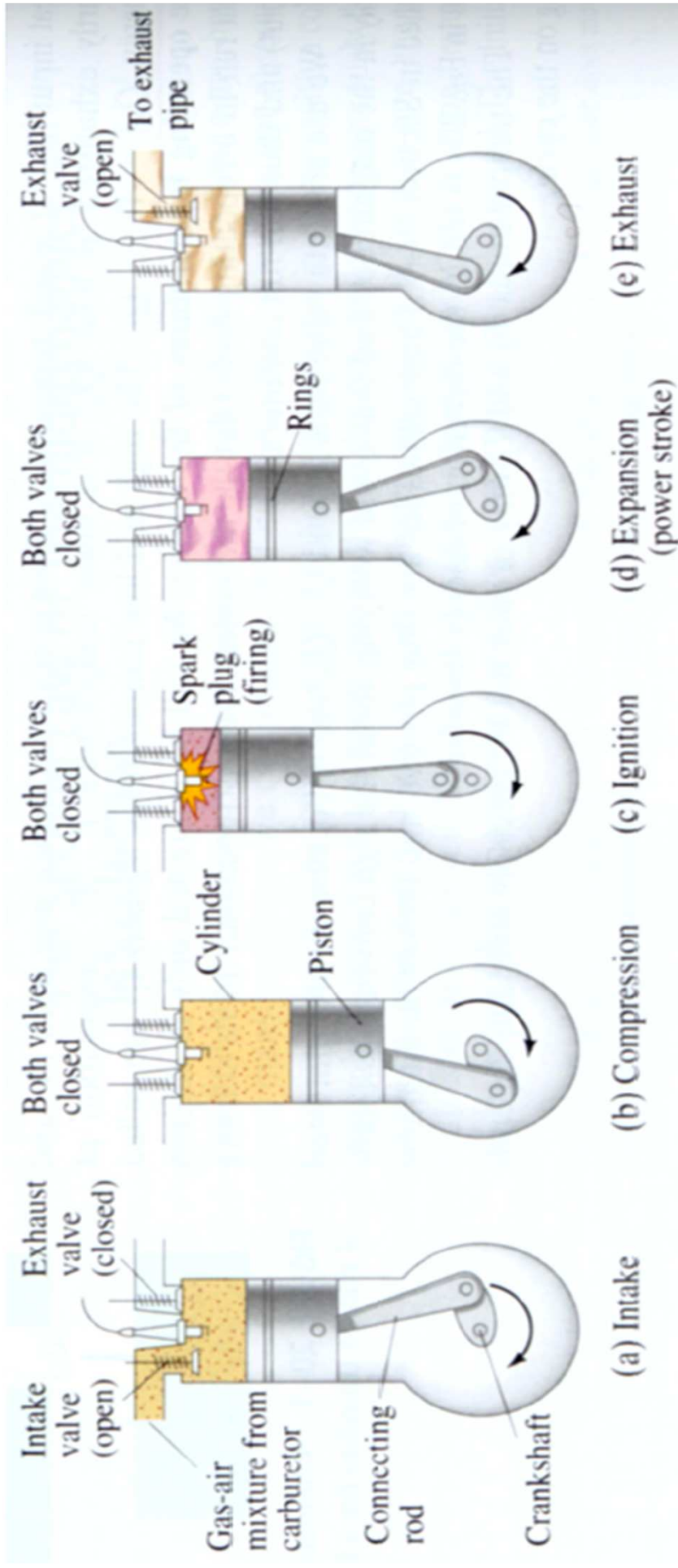
因为

$$\delta = r / \rho$$

得
$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \frac{\rho^{\gamma} - 1}{\rho - 1}$$



绝热压缩比 r 越大，效率越高。



四冲程

飞轮

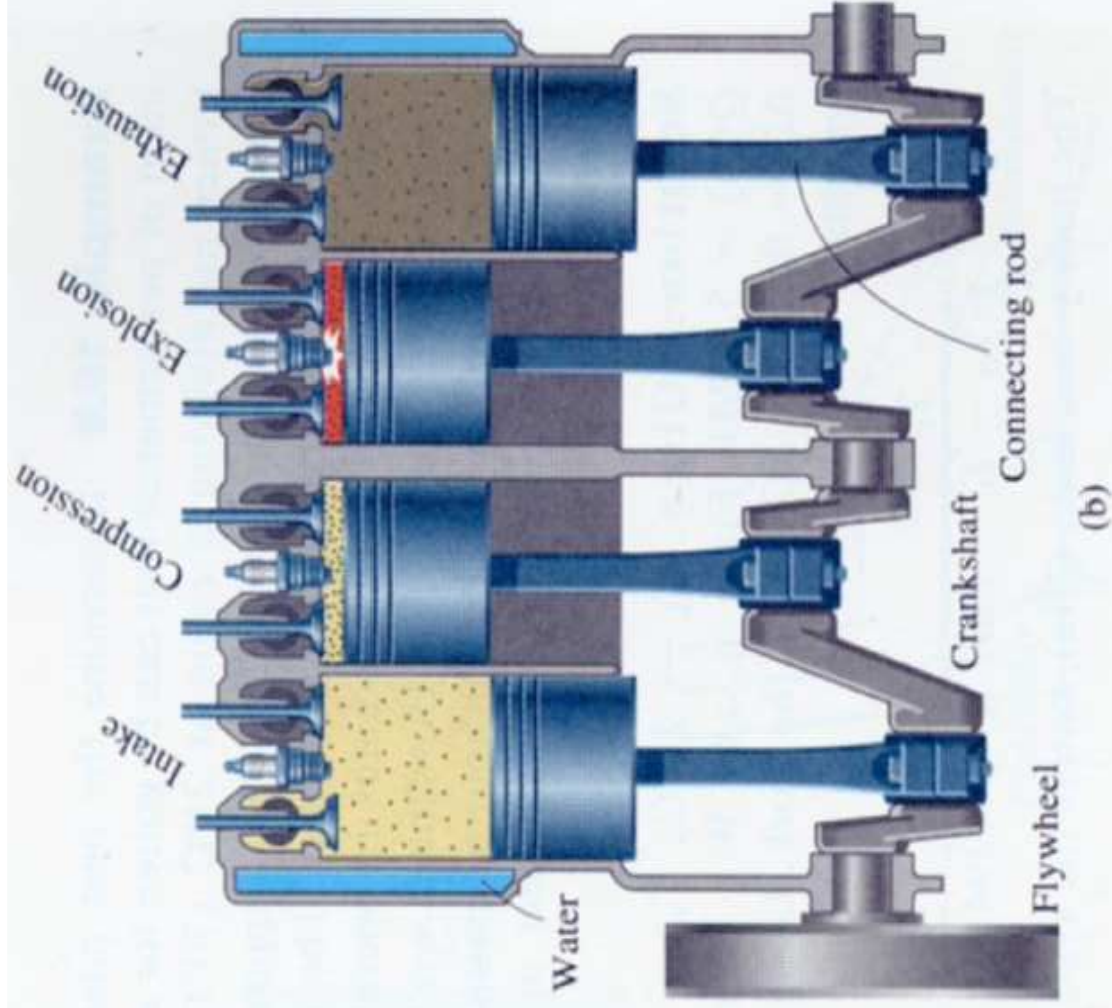


Figure 16.21 The internal compression engine. (a) The complete sequence of operations. (b) A four-cylinder engine with each cylinder undergoing a different part of the cycle.

思考：
一直敞开冰
箱门能制冷整个
房间吗？



第四章 作业

p.162 1, 2, 3, 4, 5,

8,10,14,15,18,19,24,25