

大学基础物理学

University Fundamental Physics

华东师范大学

李波

2019年

8.1 热力学第一定律



机械能守恒定律 $A_{\text{ext}} + A_{\text{int, n-cons}} = E_B - E_A$

外力做功

外力对系统做的功

$$A_{\text{ext}} = A' + Q = \Delta E$$

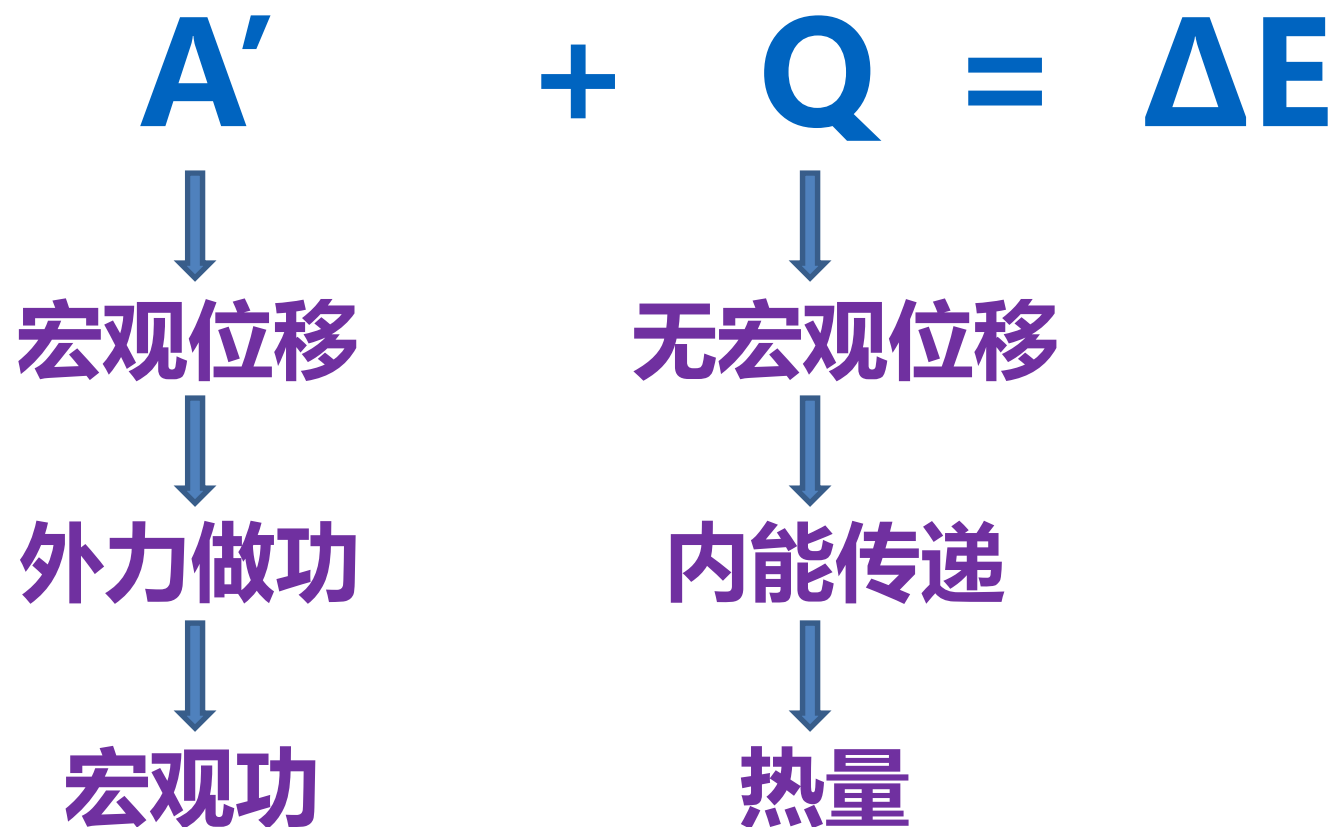
系统对外界做功 A

$$Q = \Delta E + A$$

在一个给定过程中，外界对系统做的功和传递给系统的热量之和等于系统的内能增量，这也就是**热力学第一定律**



热力学第一定律:

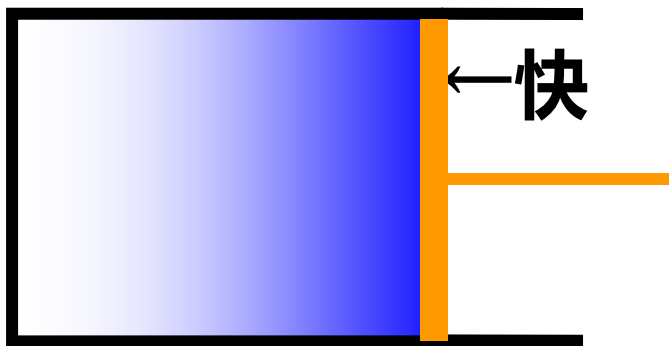


8.2 准静态过程

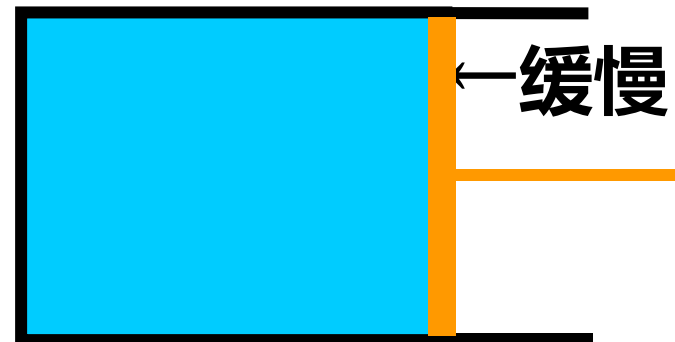


为利用平衡态的性质，引入**准静态过程**。
系统的每一状态都**无限接近**于平衡态的过程。
即准静态过程是由一系列平衡态组成的过程。

准静态过程是一个**理想化**的过程，是实际过程的近似。

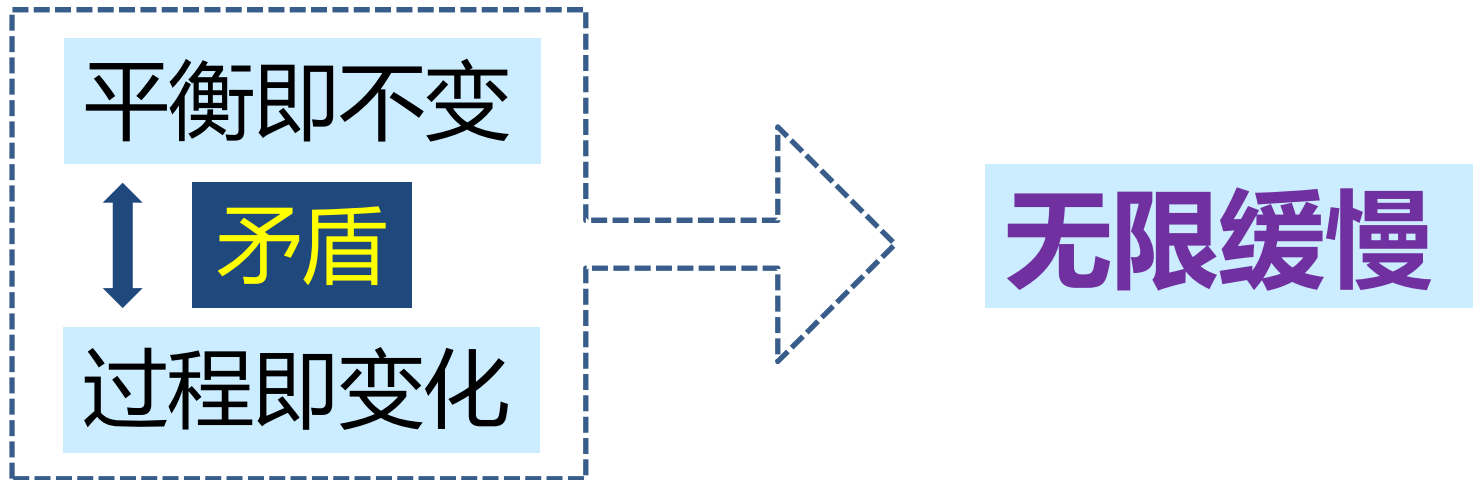


非平衡态
非准静态过程



接近平衡态
准静态过程

8.2 准静态过程



只有过程进行得无限缓慢，每个中间态才可看作是平衡态。

如何判断 “无限缓慢” *Yes or No ? ? ?*

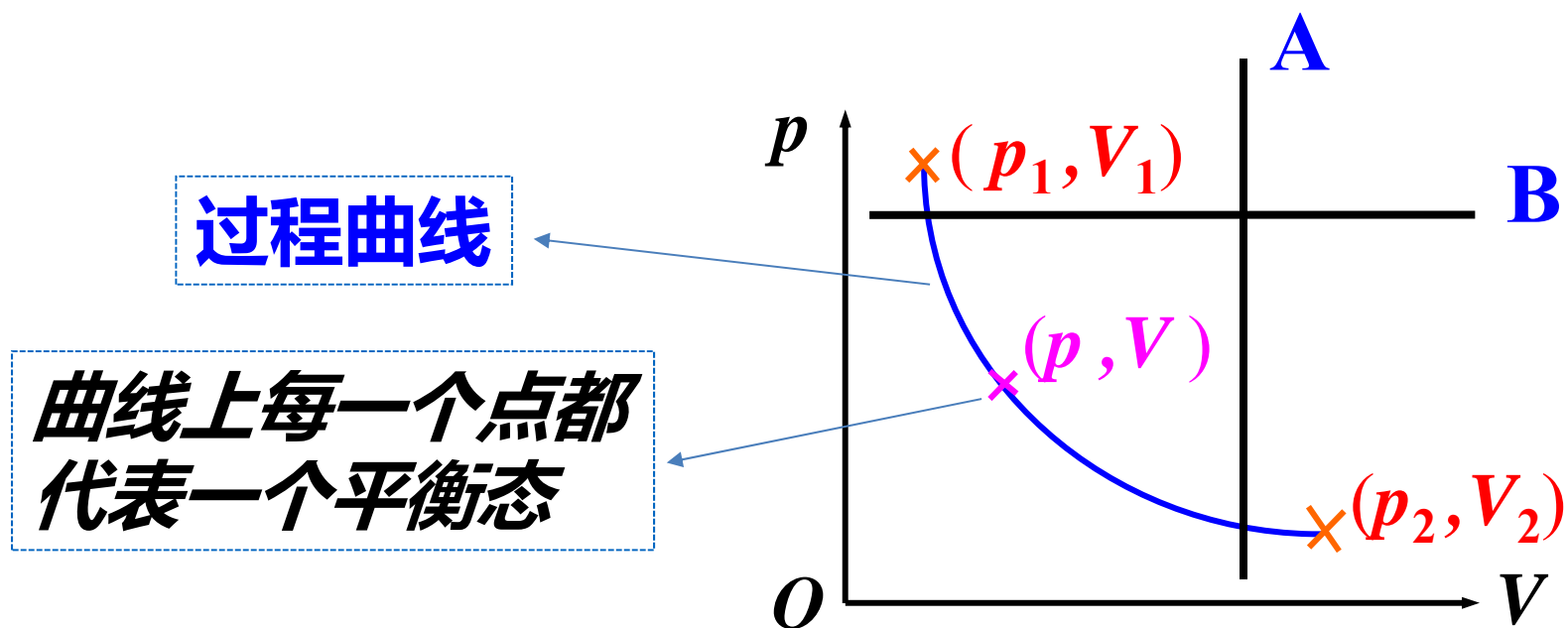
弛豫时间 (relaxation time) : 平衡态刚刚被破坏形成的**非平衡态**恢复到平衡态所需要的时间。

过程变化的时间 \gg 弛豫时间 就可以看作为准静态过程，无限缓慢是一个**相对**的概念。

热力学第一定律



准静态过程可以用**过程曲线**来表示：



平衡态组成的准静态过程，非平衡态无法做出过程曲线

改变系统状态的方法：**做功** & **传热**

热力学第一定律

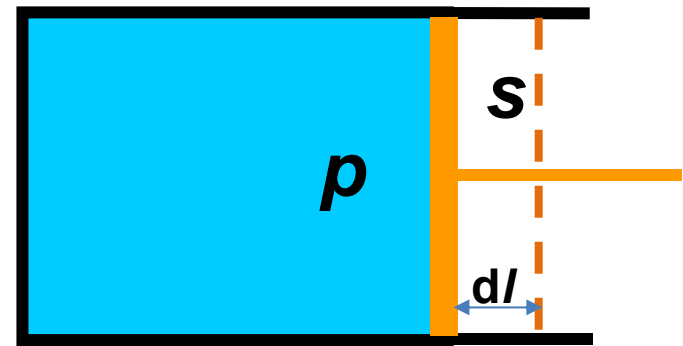


通过**作功**可以改变系统的状态

在忽略摩擦力的情况下，**气体对外界做的体积功**： $\delta A = p \, dl = p \, dV$

膨胀， $dV > 0$ ，则系统对外做功

缩小， $dV < 0$ ，则外界对系统做功



系统经历准静态过程，体积由 V_1 变化到 V_2 时，系统对外界做的**总功**为

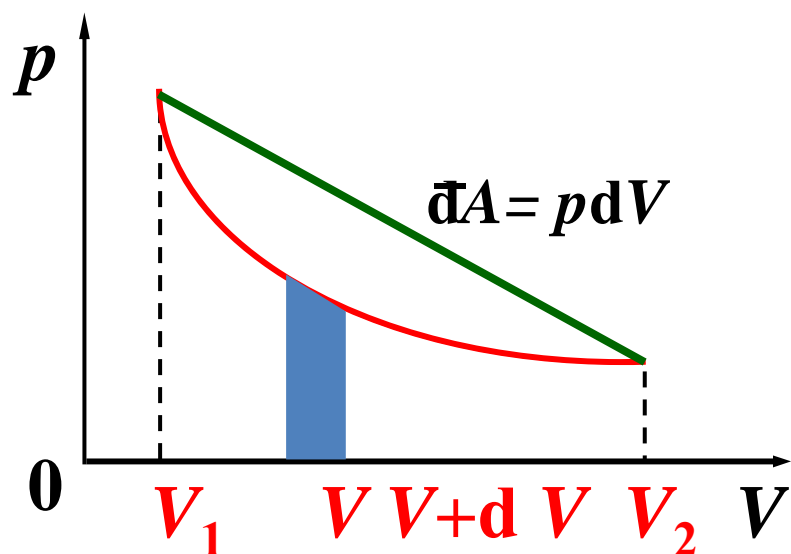
$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$

热力学第一定律



过程曲线下的面积 = 功

初态，终态相同功也不一定一样，和过程有关。因此，功是**过程量**



$$Q = \Delta E + A$$

内能 E 由系统状态决定，和过程无关，是**状态量**

热量 Q 也是 **过程量**



过程量与状态量

过程量 A, Q

状态量 E

$$Q = \Delta E + A$$

8.3 热容



—摩尔物质温度升高1度所吸收的热量叫
摩尔热容量， 即：

$$C_m = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)$$

ν —— 摩尔数

定体摩尔热容量

$$C_{V, m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

定压摩尔热容量

$$C_{p, m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

8.3 热容



定体摩尔热容量

$$C_{V,m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V$$

体积不变 $\delta A_V = 0$

做功为 **0**

$$C_{V,m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V \longrightarrow C_{V,m} = \frac{1}{\nu} \frac{dE}{dT}$$

+

$$C_{V,m} = \frac{i}{2} R \longleftarrow E = \frac{i}{2} \nu R T$$

8.3 热容



定压摩尔热容量

$$C_{p, m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

$$(\delta Q)_p = dE + p dV$$

$$C_{p, m} = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p = C_{p, m} = \frac{1}{\nu} \frac{\delta E}{dT} + \frac{p}{\nu} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p$$

+

$$C_{p, m} = \frac{i}{2} R + R$$

$$\longleftarrow E = \frac{i}{2} \nu RT \quad \& \quad pV = \nu RT$$

8.3 热容



$$C_{p,m} = \frac{i}{2}R + R$$

|

$$C_{V,m} = \frac{i}{2}R$$

||

$$C_{p,m} - C_{v,m} = R$$

迈耶公式

$$C_{p,m} = \frac{i}{2}R + R$$

+

$$C_{V,m} = \frac{i}{2}R$$

||

$$\gamma = \frac{C_{p,m}}{C_{V,m}} = \frac{i+2}{i}$$

比热比

8.3 绝热过程



绝热过程：系统和外界没有热量交换的过程。

下列条件下的过程可视为绝热过程：

- ▲ 良好绝热材料包围的系统发生的过程；
- ▲ 进行得较快而来不及和外界发生热交换的过程。

特点： $\delta Q = 0$

$$\text{由 } \delta Q = dE + \delta A \rightarrow ??$$

8.3 绝热过程



常温下 $\gamma = \text{const.}$

$$\int \frac{dp}{p} = \int -\gamma \frac{dV}{V} \rightarrow \ln p = -\gamma \ln V + C'$$

$$\ln(pV^\gamma) = C' \xrightarrow{\text{令}} \ln C$$

\therefore

$$pV^\gamma = C$$

— 绝热过程方程

或

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

另有

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.}$$

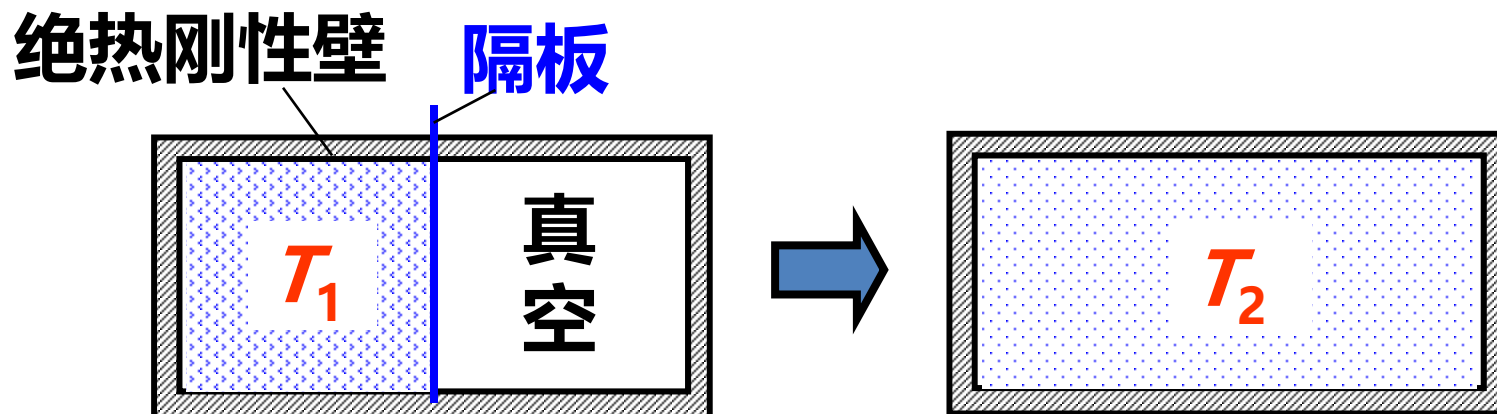
$$p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = \text{const.}$$

} 自己推导

8.3 绝热过程



二. 绝热自由膨胀 (非准静态绝热过程)



$$\left. \begin{array}{l} \text{器壁绝热: } Q = 0 \\ \text{向真空膨胀: } A = 0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{热一律}} E_1 = E_2$$

$$\text{对理想气体: } T_1 = T_2$$

$$V_2 = 2V_1 \quad p_2 = 0.5p_1$$



过程	A	Q	ΔE
等体	0	$\frac{i}{2}(p_2 - p_1)V$	$\frac{i}{2}(p_2 - p_1)V$
等温	$\nu RT \ln(V_2 / V_1)$	$\nu RT \ln(V_2 / V_1)$	0
绝热	$\frac{i}{2}(p_1 V_1 - p_2 V_2)$	0	$\frac{i}{2}(p_2 V_2 - p_1 V_1)$
等压	$p(V_2 - V_1)$	$\frac{i+2}{2} p(V_2 - V_1)$	$\frac{i}{2} p(V_2 - V_1)$

ν 摩尔理想气体，经准静态从态1，变化到态2，以分子自由度和系统初、末态表示 A , Q , ΔE

循环过程：系统（如热机中的工质）经一系列变化后**又回到初态**的整个过程叫循环过程。

实例：火力发电厂的热力循环

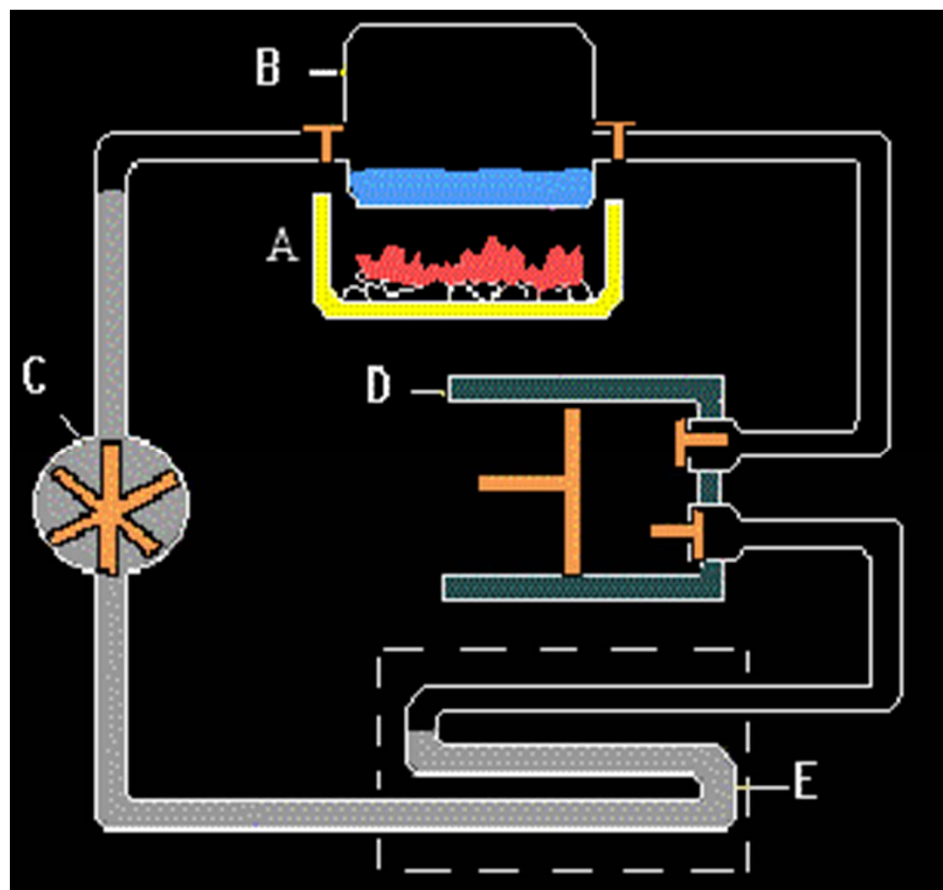
1. 一定量水从锅炉B中吸收热量 Q_1 变成高温高压蒸汽。

2. 进入气缸D，膨胀推动汽轮机对外做功 A_1 。

3. 做功后，温度和压强大为降低，成为废气。

4. 废气进入冷凝器E后凝结为水，放出热量 Q_2

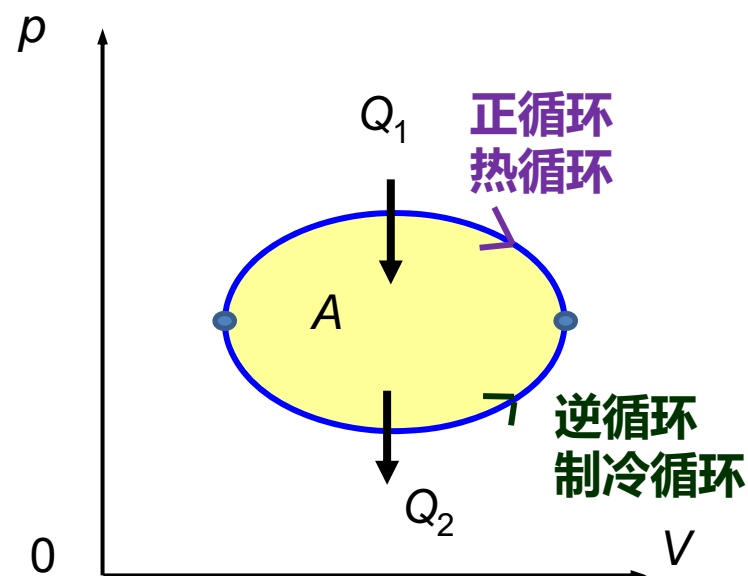
5. 由泵C对水做功 A_2 ，将其压入锅炉。



循环过程



如果循环的各阶段均为准静态过程，则循环过程可用状态图（如 $p - V$ 图）上的闭合曲线表示。



热循环（正循环）

定义热循环效率：

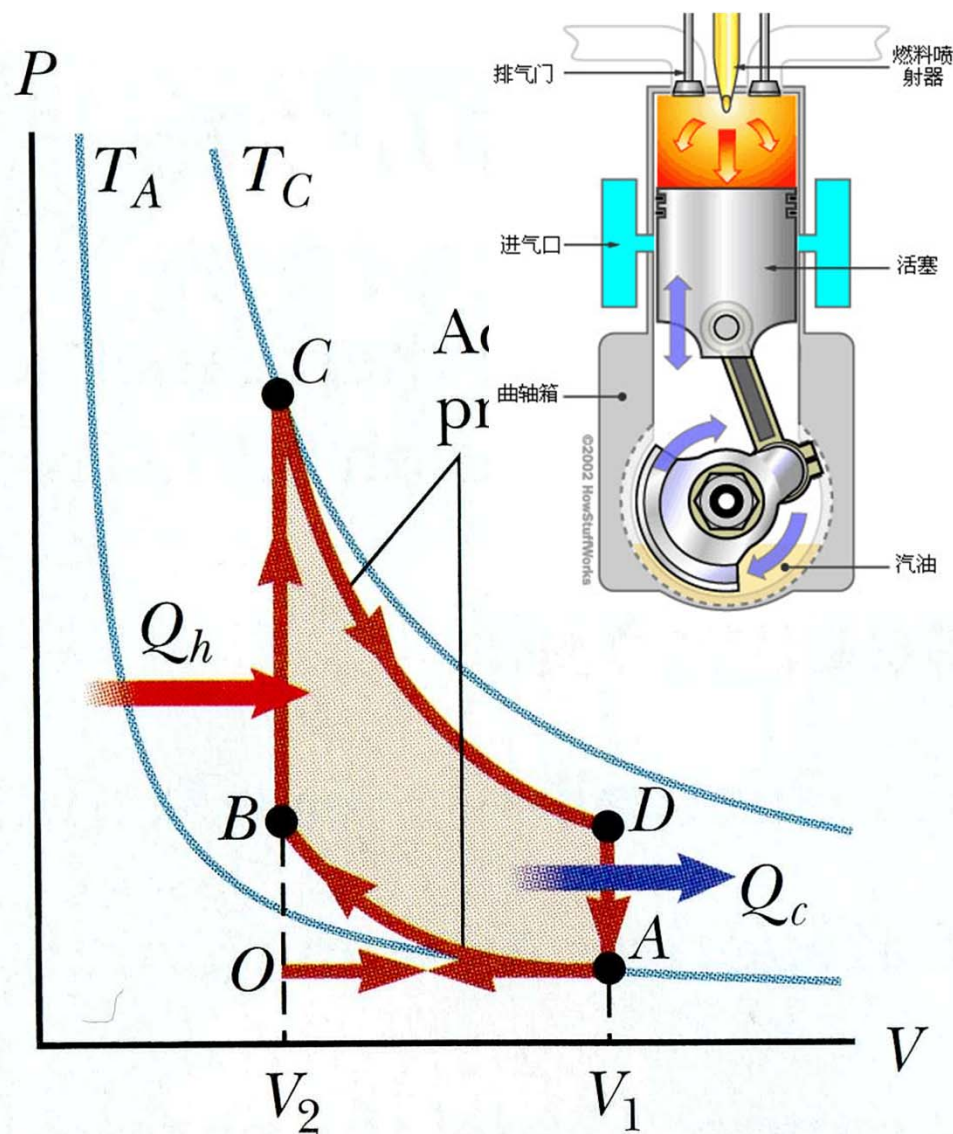
$$\eta = \frac{\text{净功}}{\text{高温吸收的热量}} = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

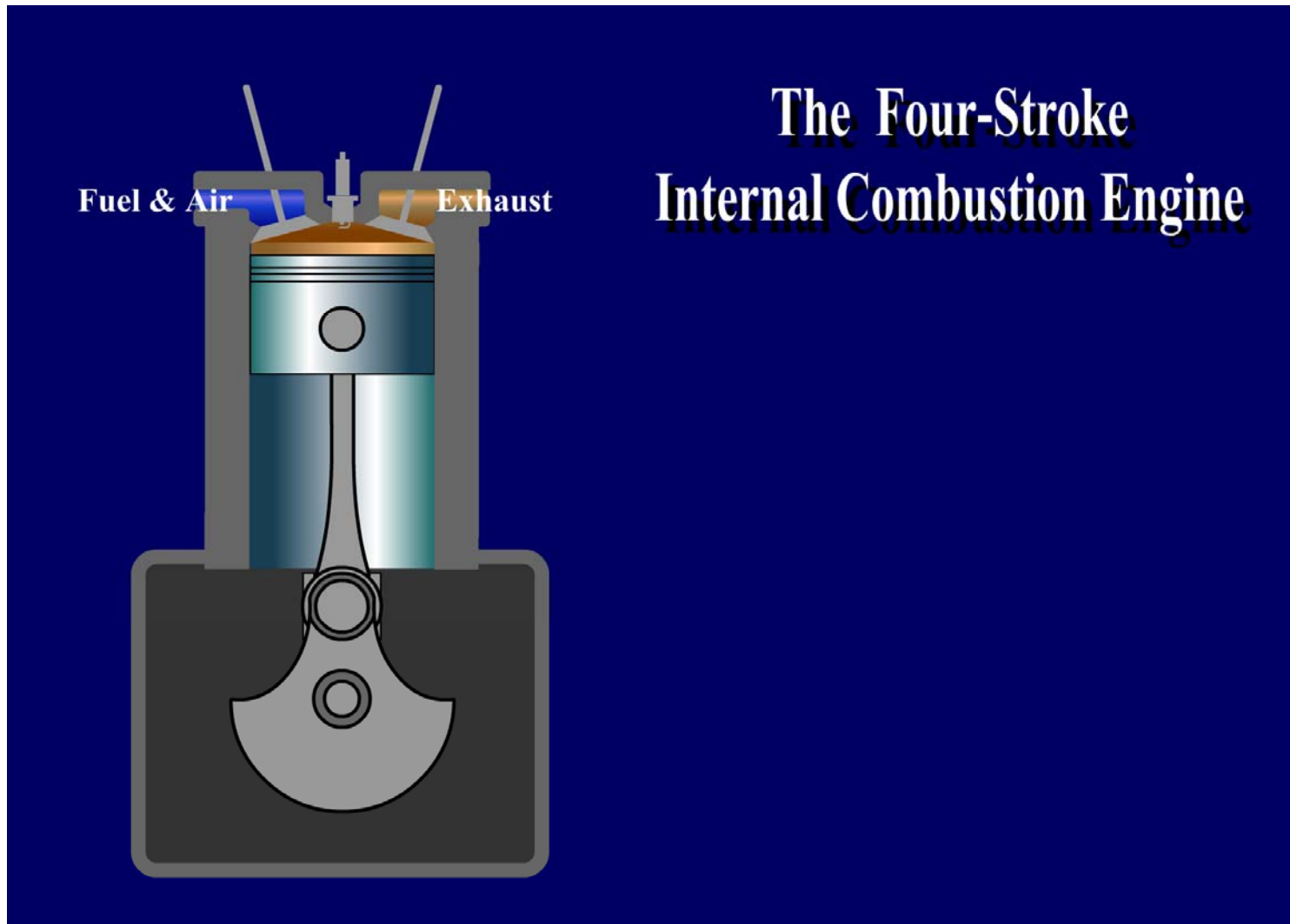
$\eta_{\text{蒸汽机}} \sim \text{十几} \% , \quad \eta_{\text{内燃机}} \sim 20 - 30 \%$

循环过程



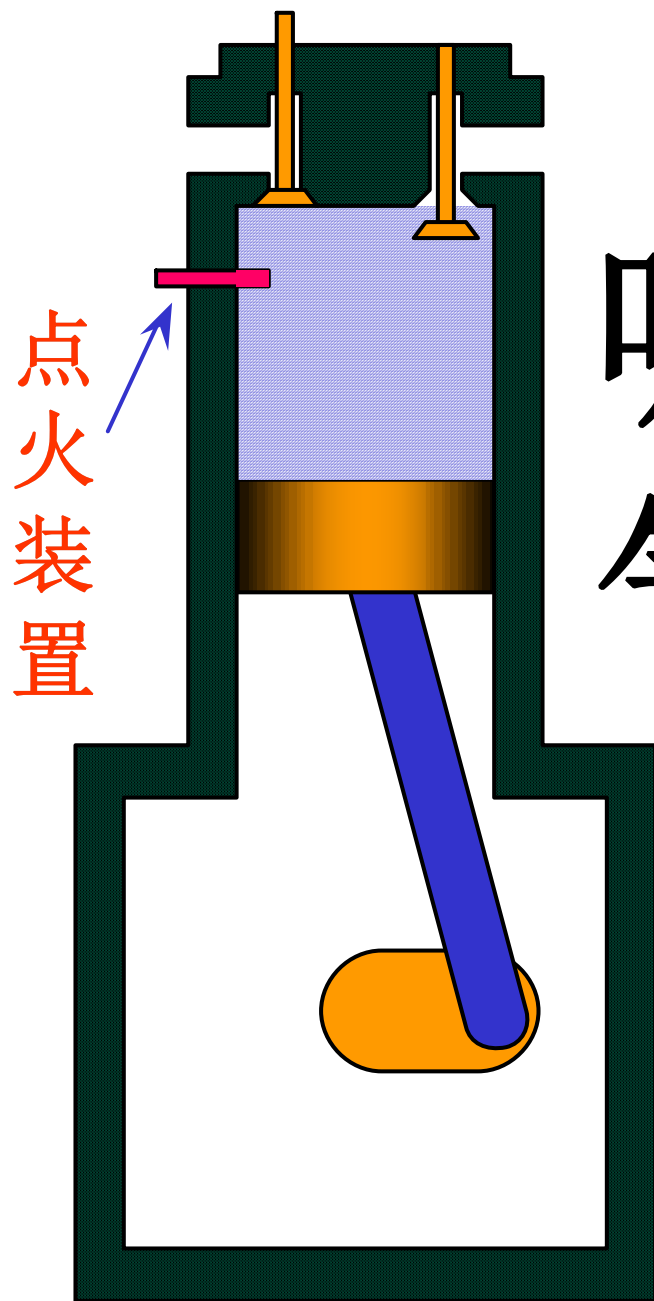
1876, 德国工程师奥托



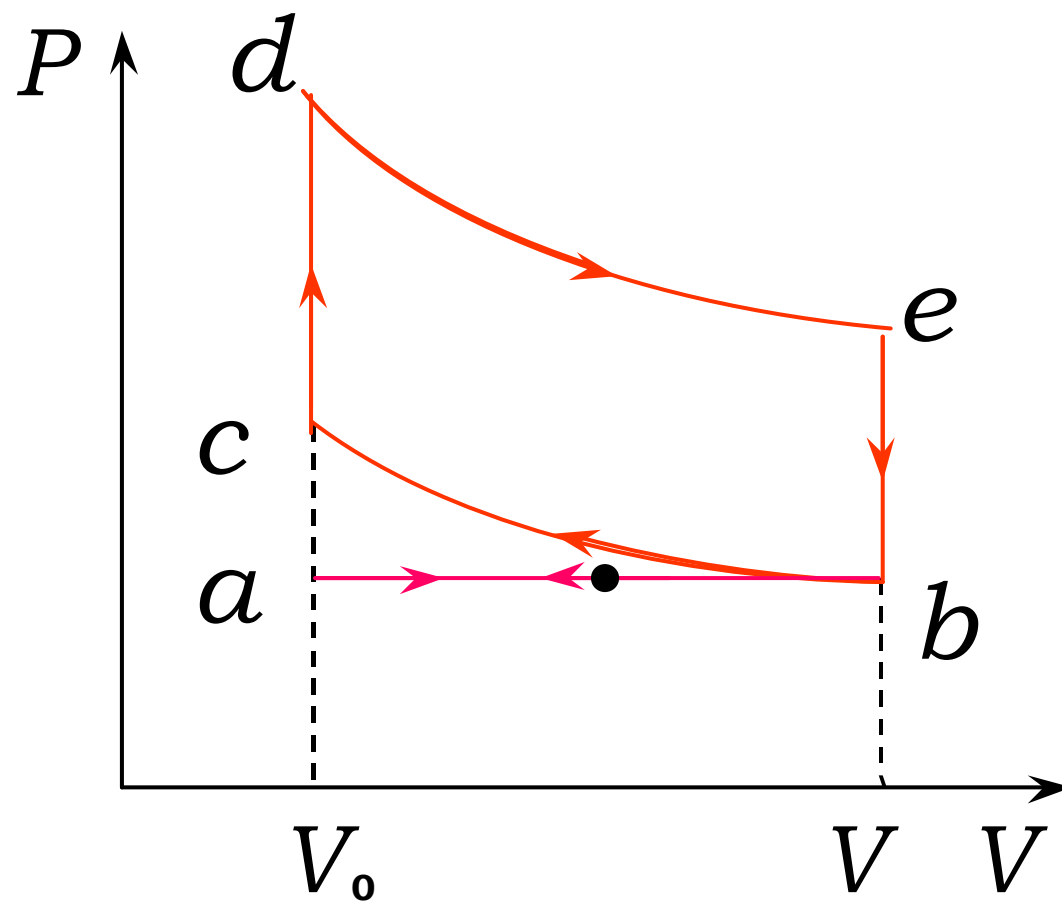


四冲程: <http://science.sbccc.edu/~physics/flash/heatengines/4stroke.html>

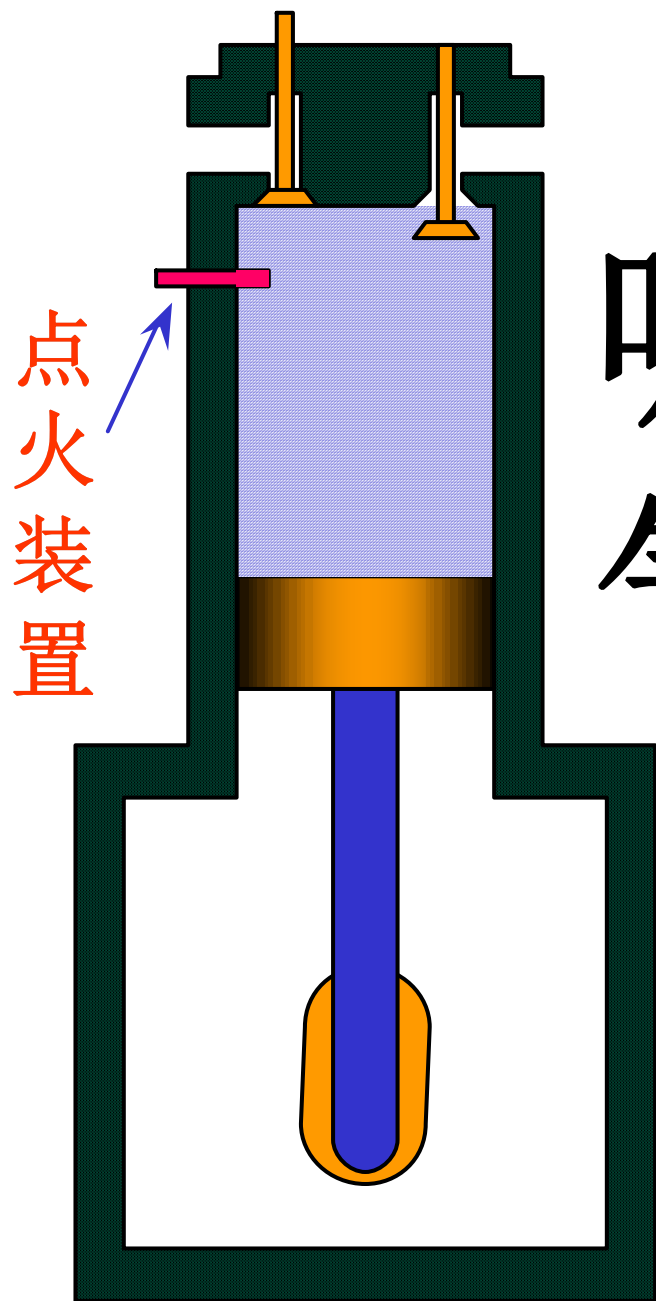
奥托循环



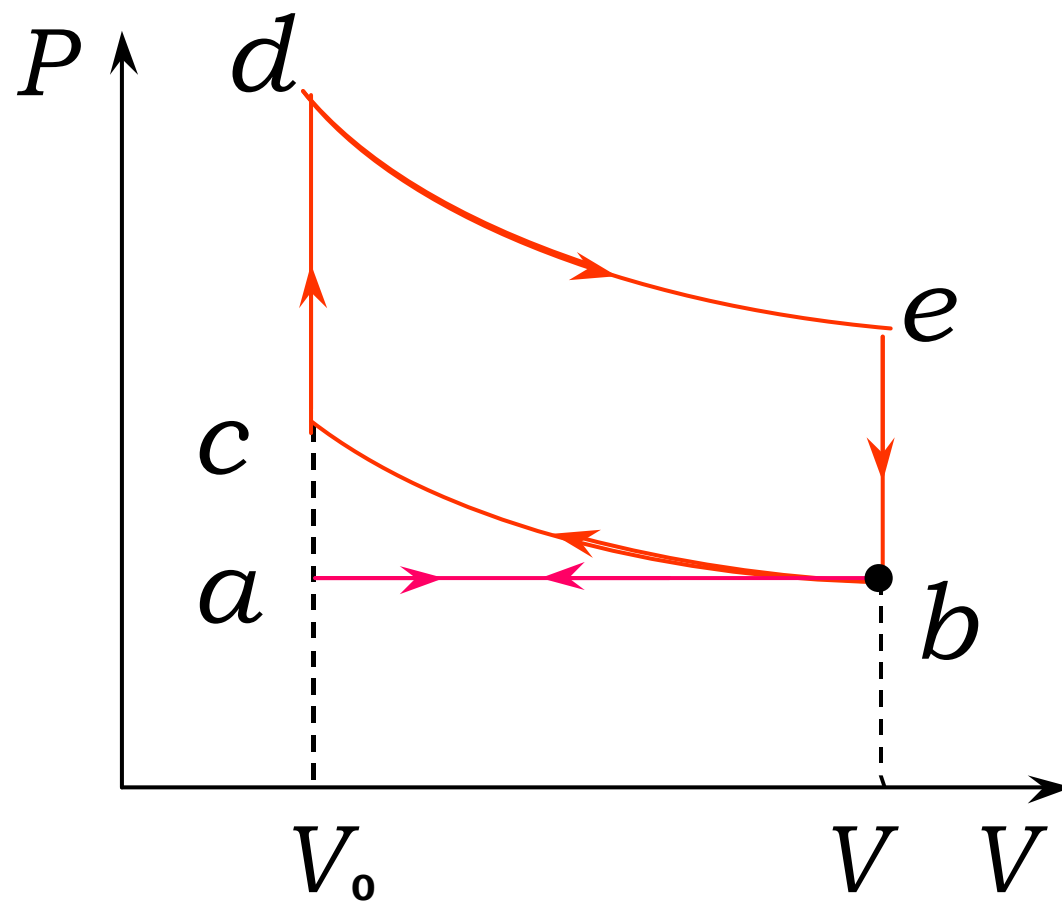
吸气



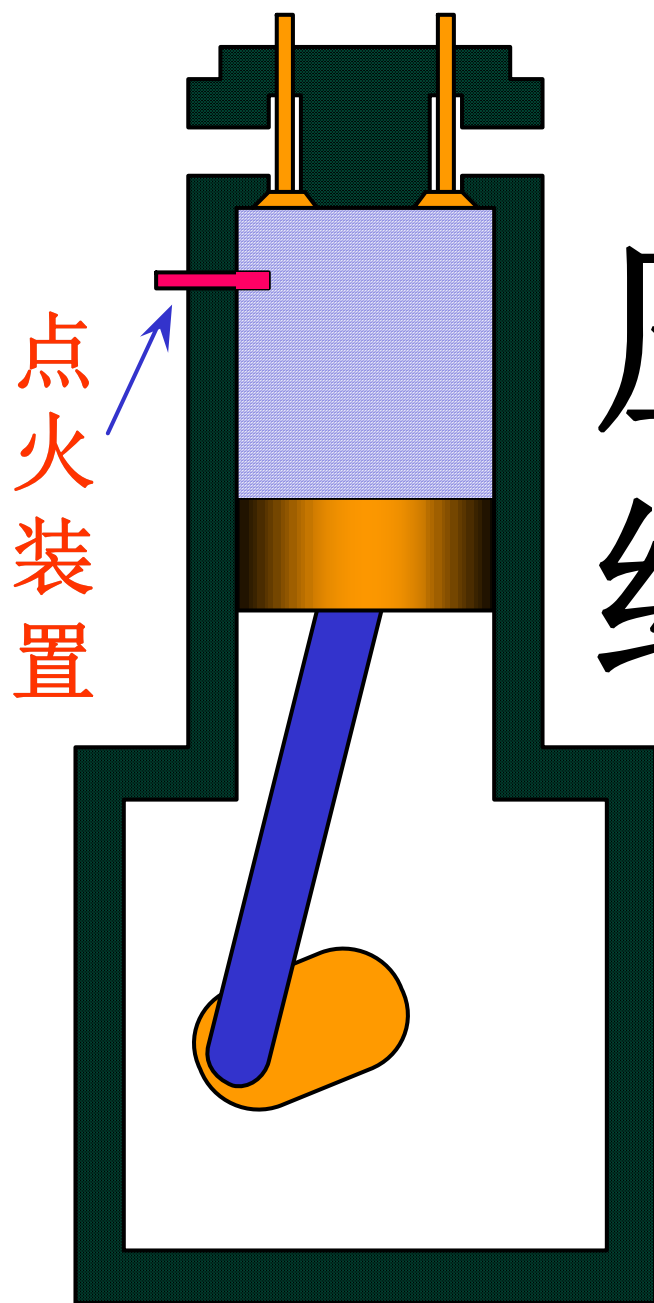
奥托循环



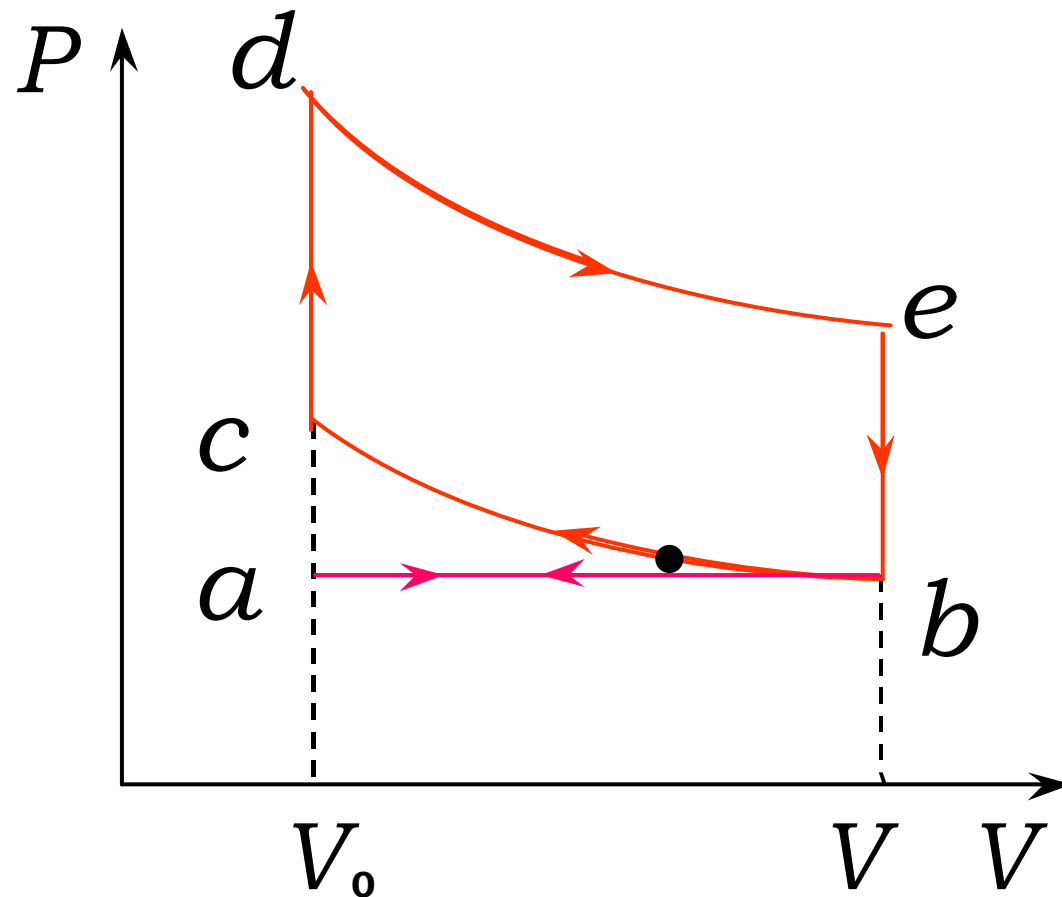
吸气



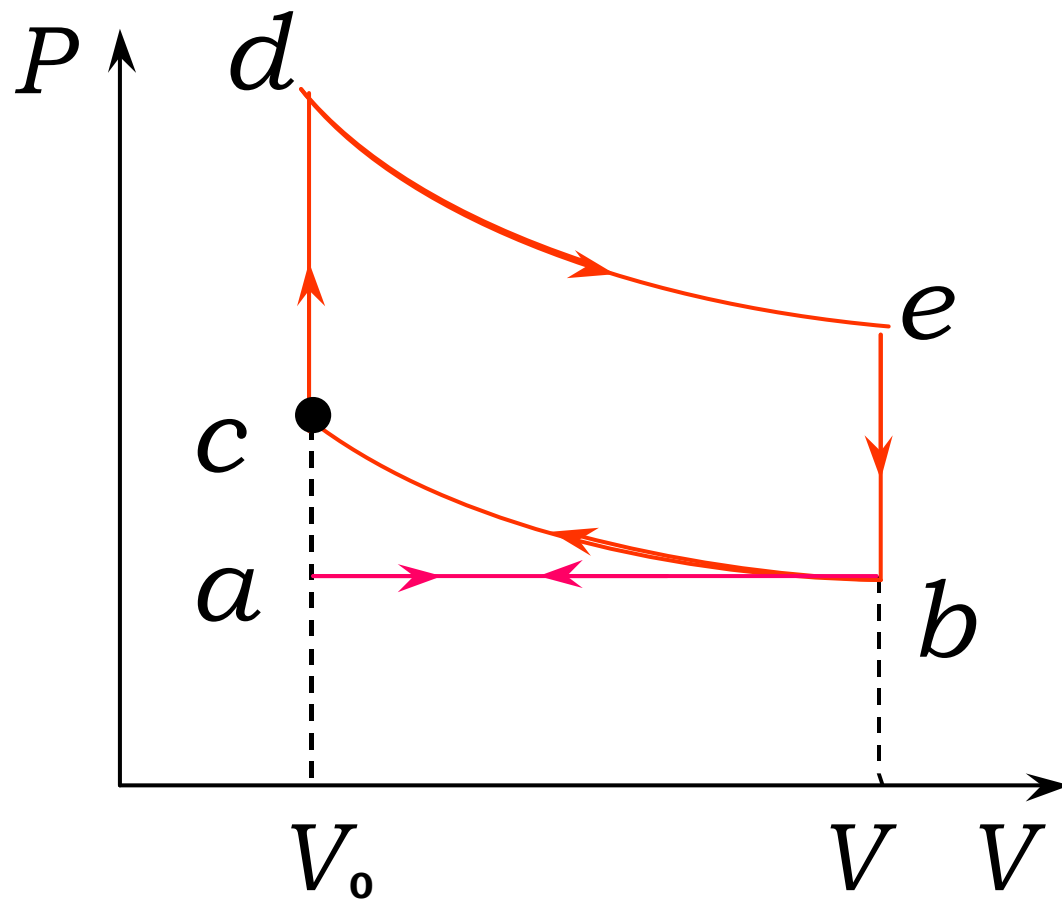
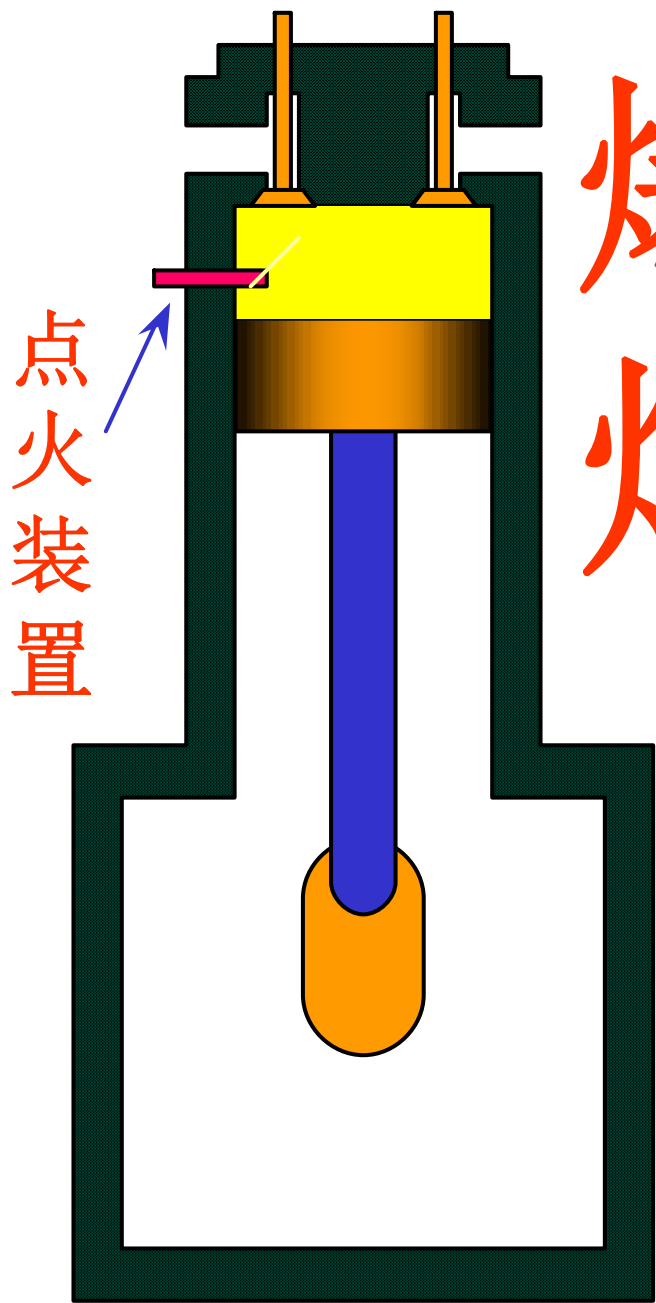
奥托循环



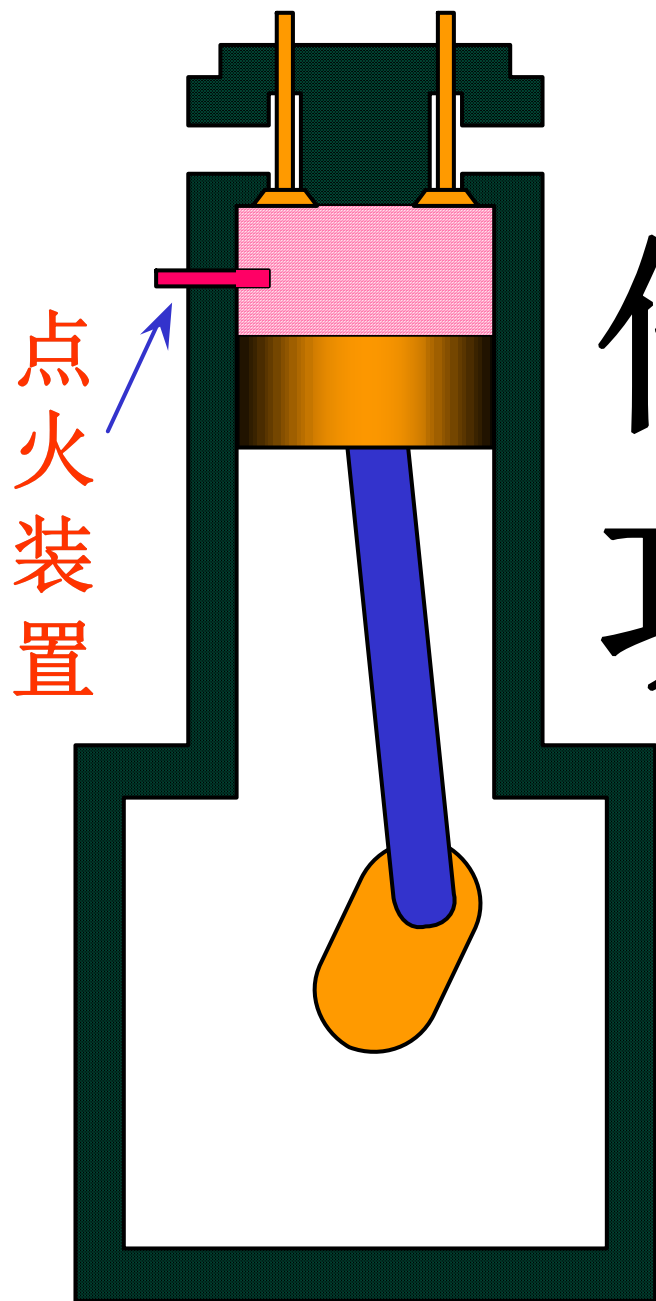
压缩



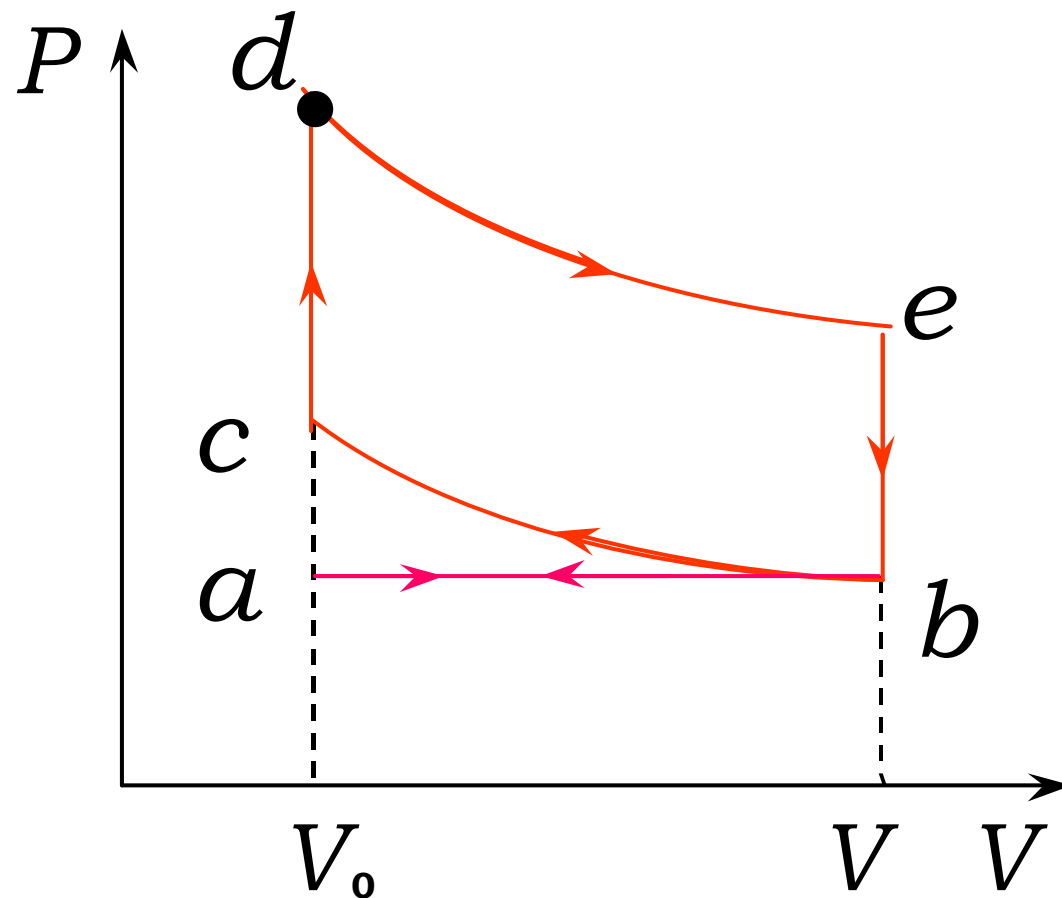
奥托循环爆炸



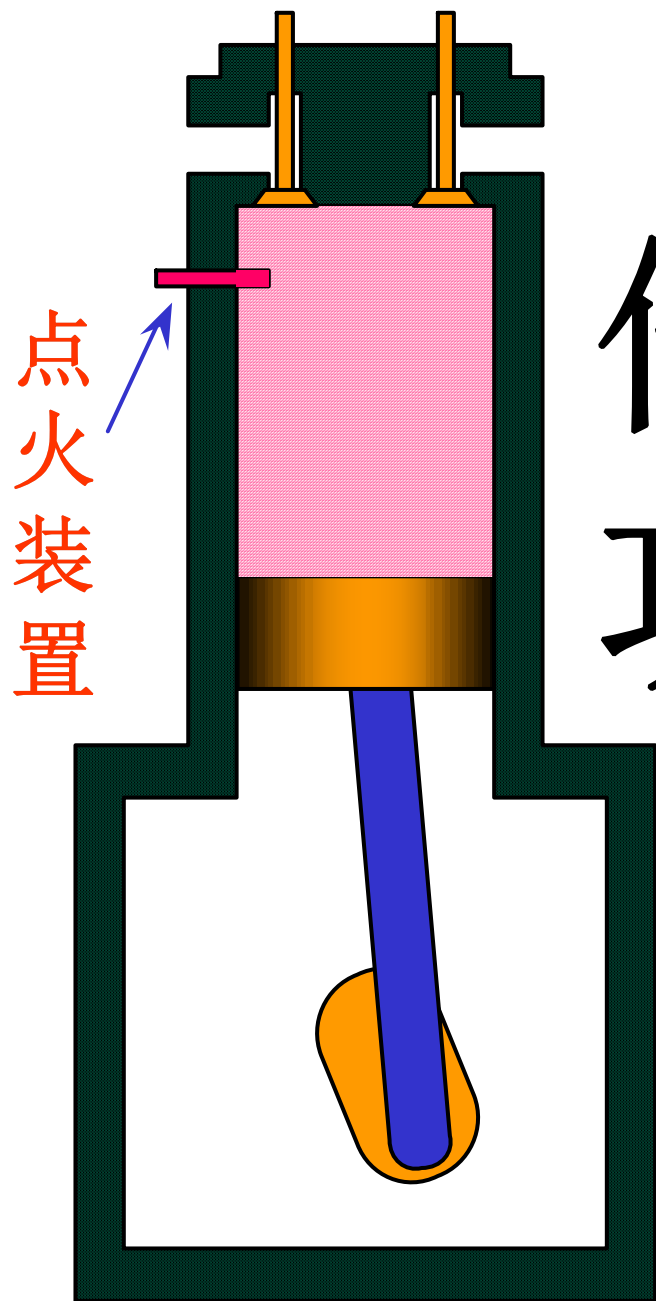
奥托循环



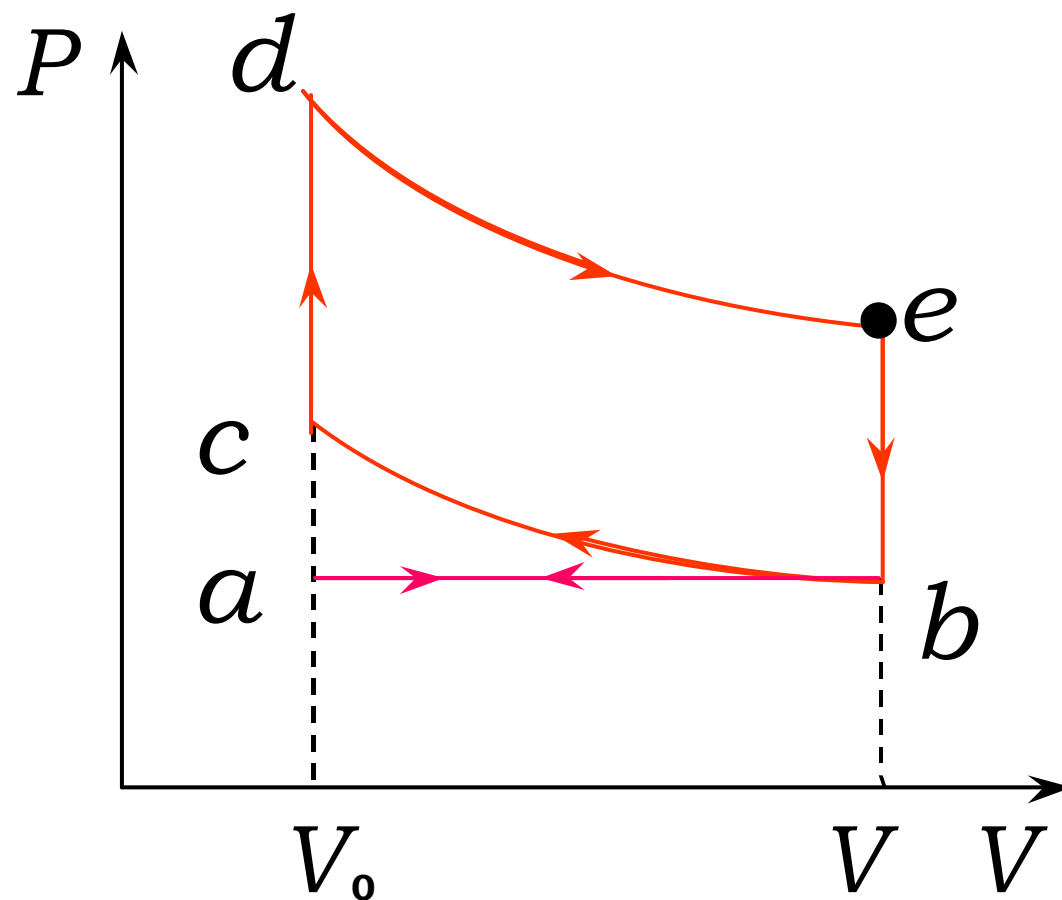
做功



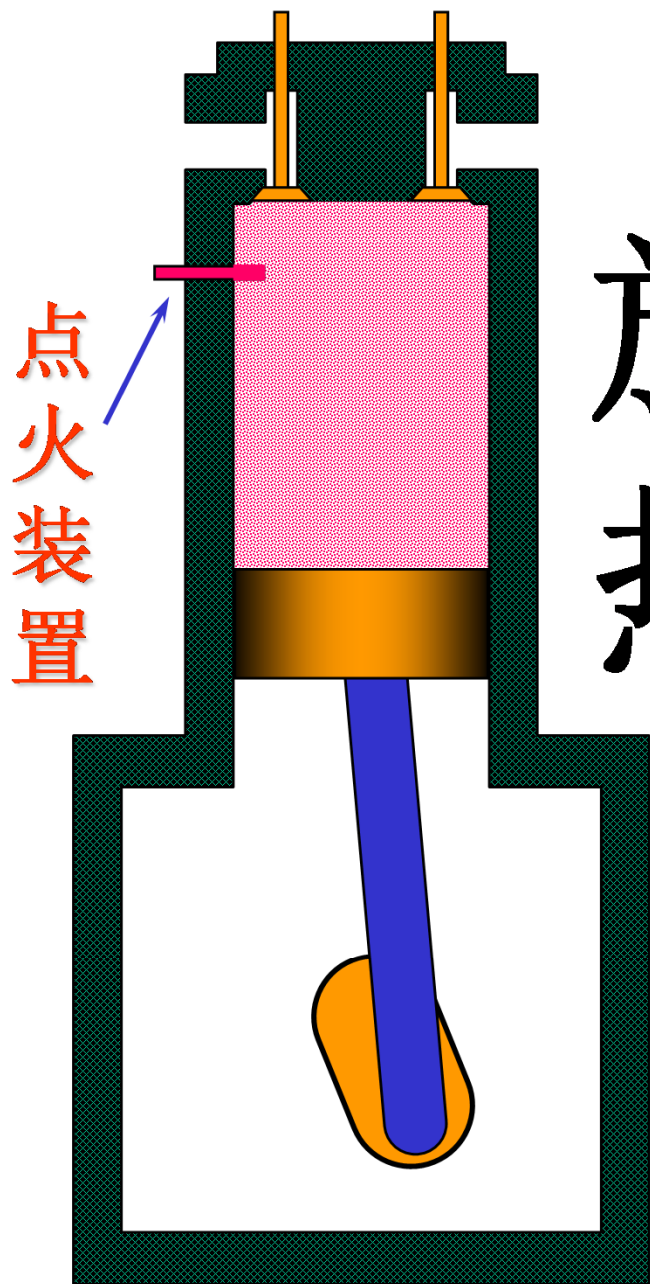
奥托循环



做功

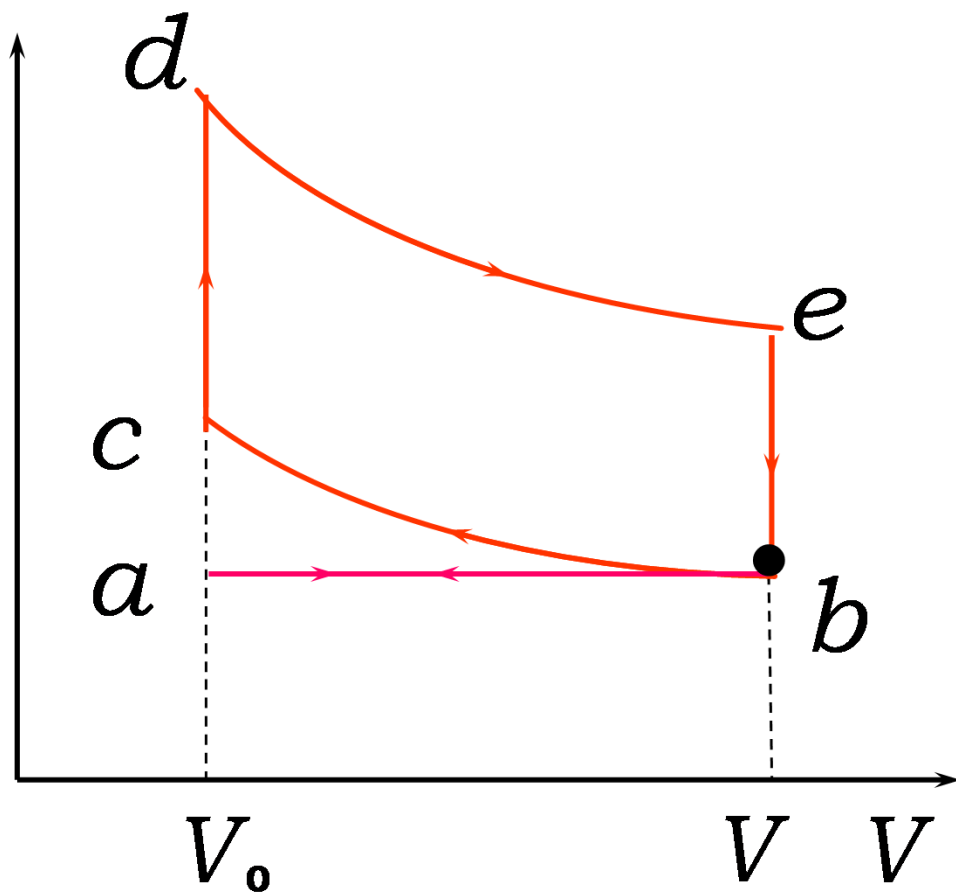


奥托循环

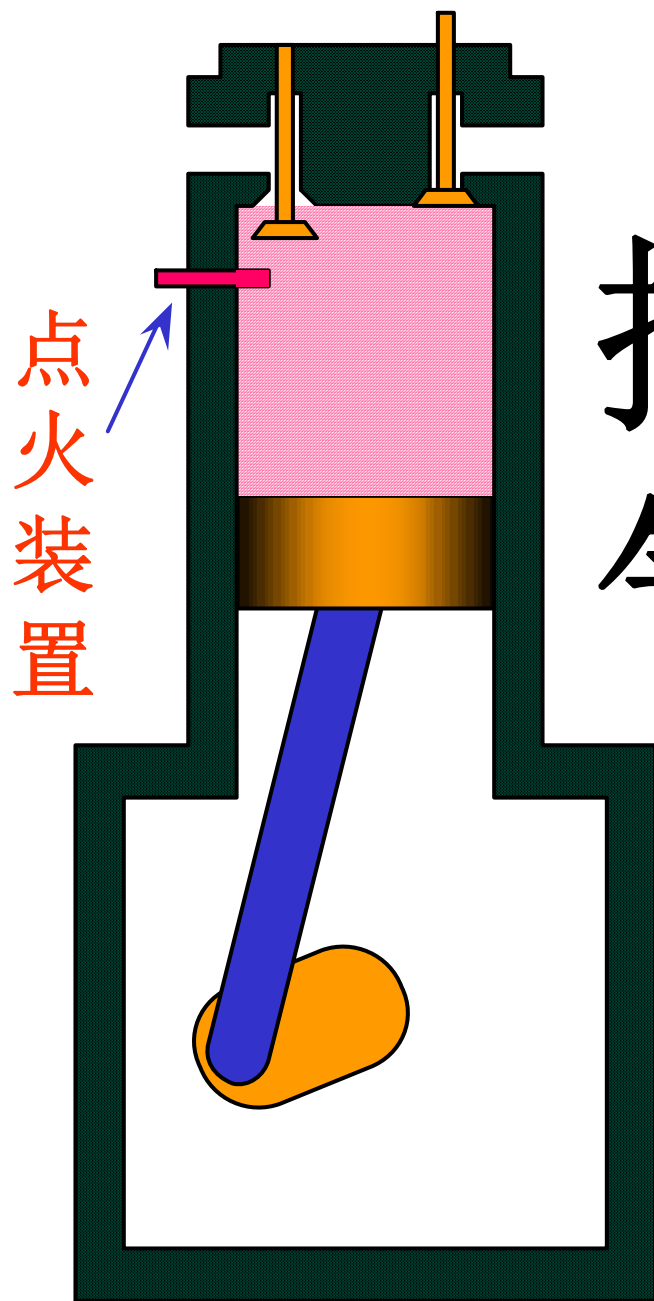


放热

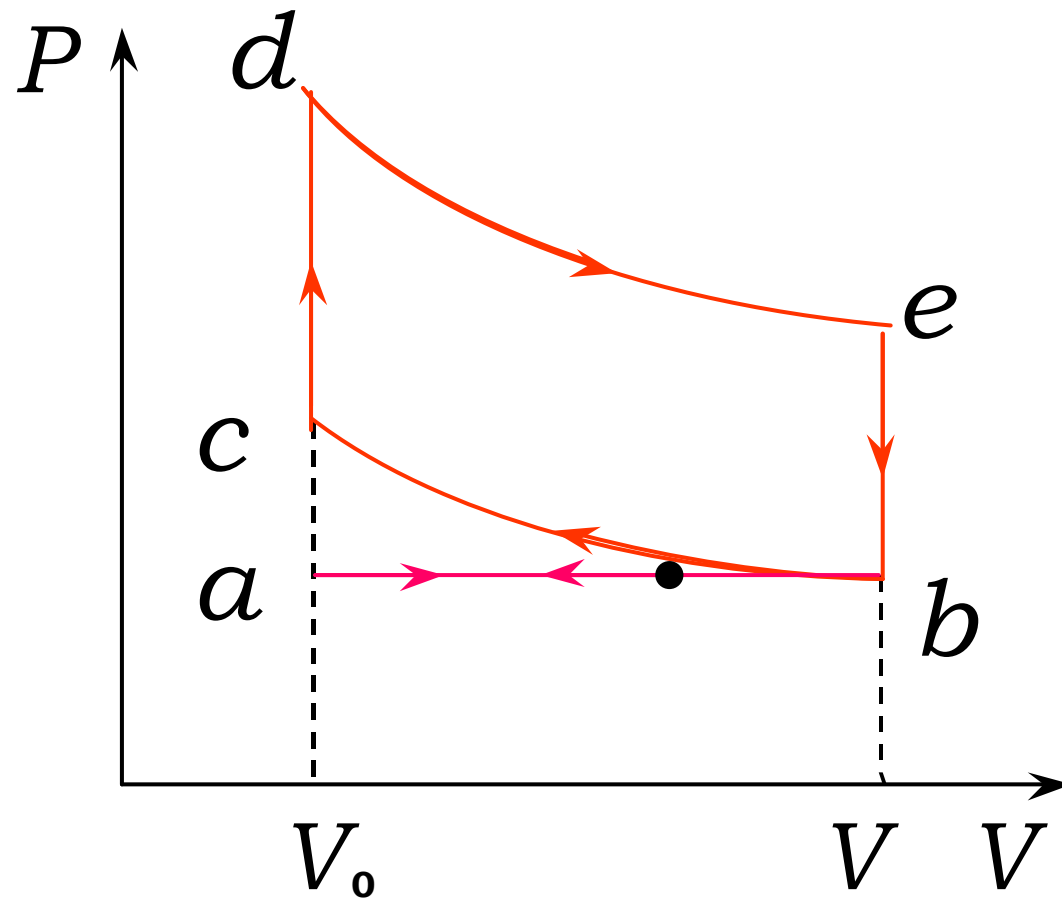
P



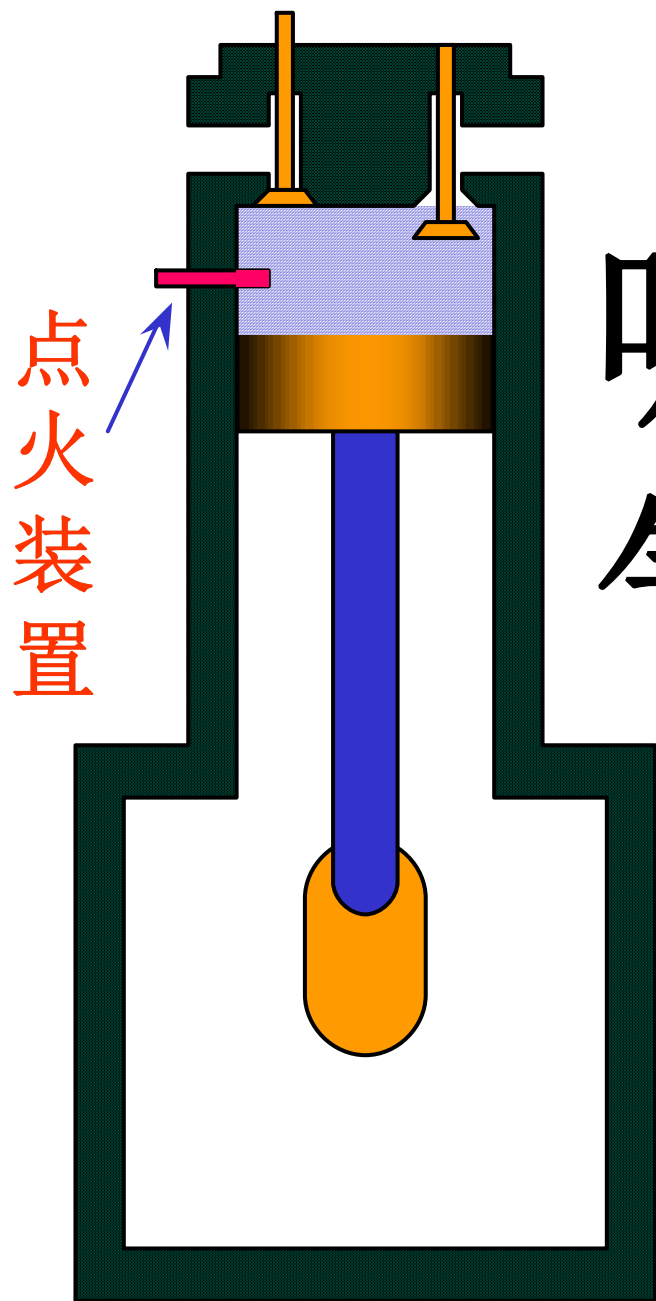
奥托循环



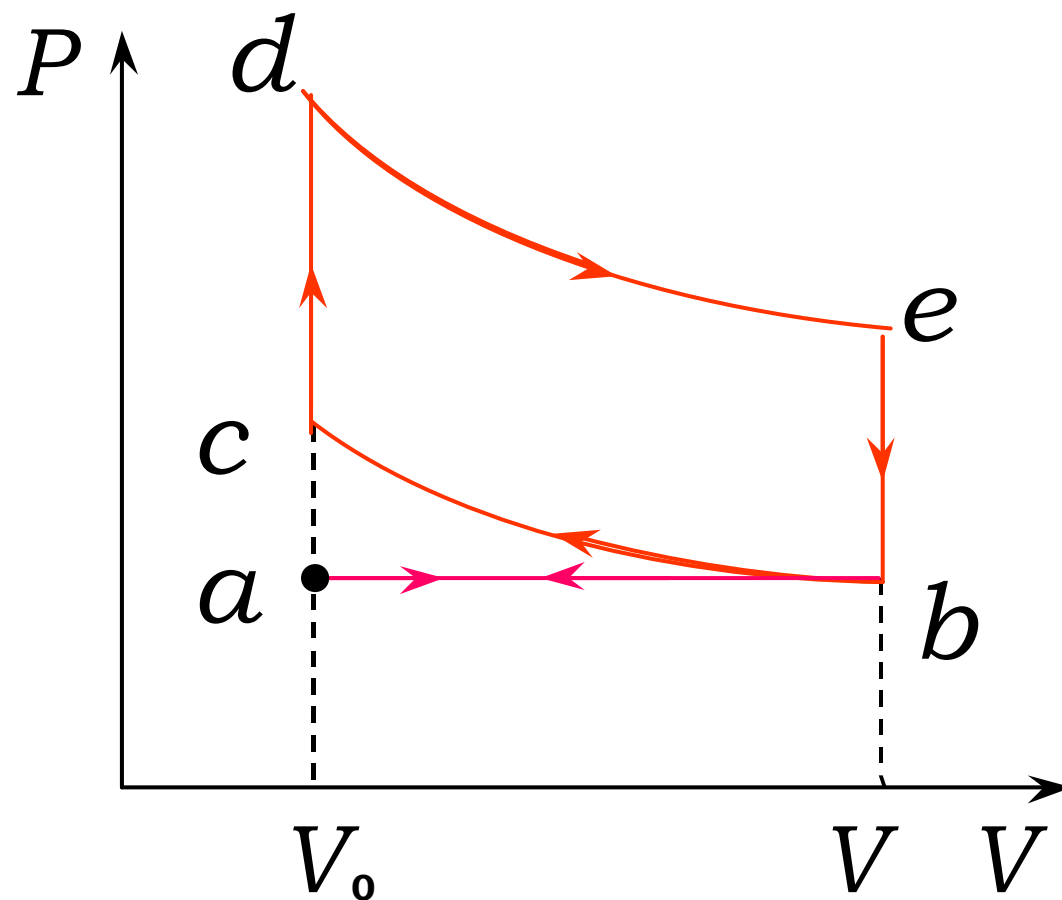
排气



奥托循环



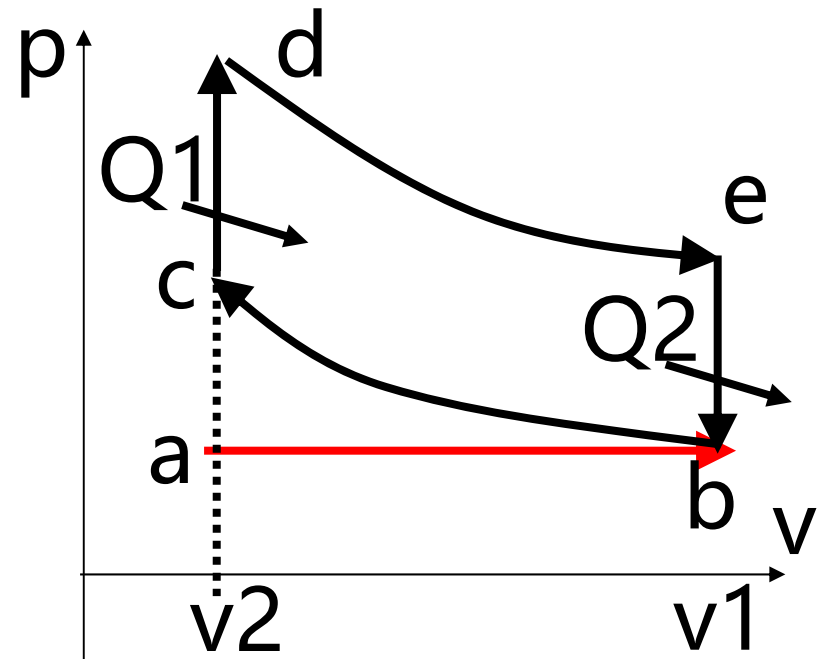
吸气





例：空气标准奥托循环的效率

- 1: (b-c, 绝热压缩, V_1, T_1 --- V_2, T_2)
- 2: (c-d, 等体吸热, V_2, T_2 --- V_2, T_3)
- 3: (d-e, 绝热膨胀, V_2, T_3 --- V_1, T_4)
- 4: (e-b, 等体放热, V_1, T_4 --- V_1, T_1)



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



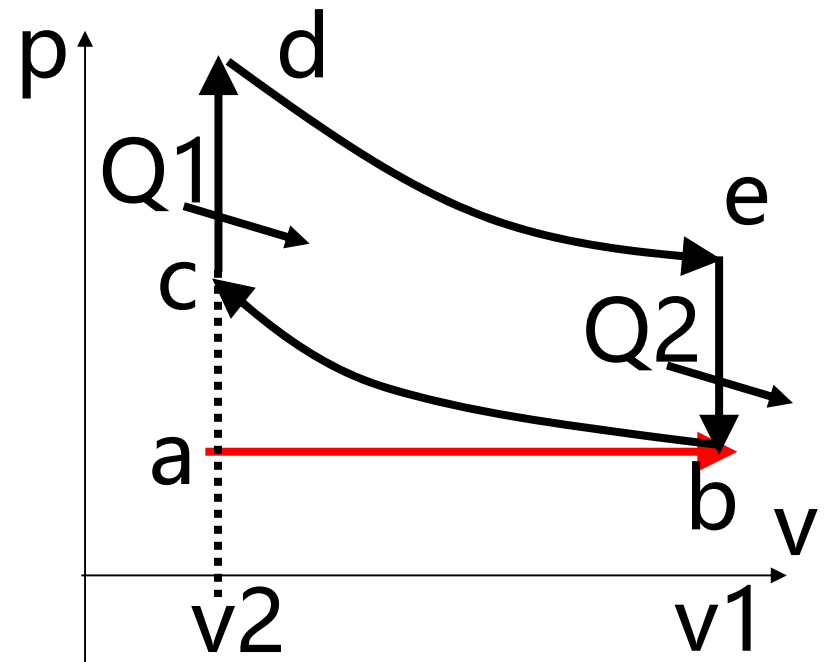
2: c-d, 等体吸热
 $V_2, T_2 \rightarrow V_2, T_3$

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

4: e-b, 等体放热
 $V_1, T_4 \rightarrow V_1, T_1$

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

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



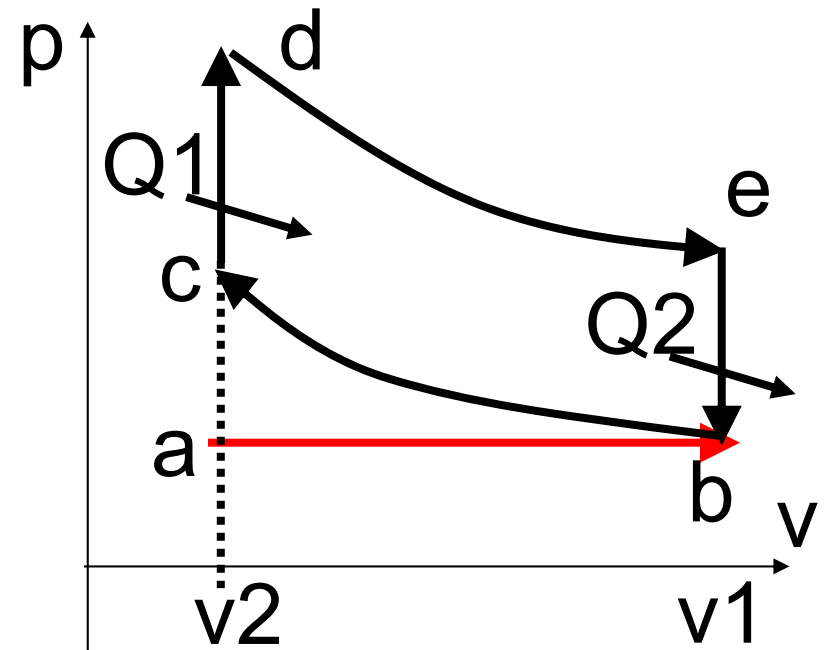


1: b-c, 绝热压缩
V1, T1---V2, T2

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

3: d-e, 绝热膨胀
V2, T3---V1, T4

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$



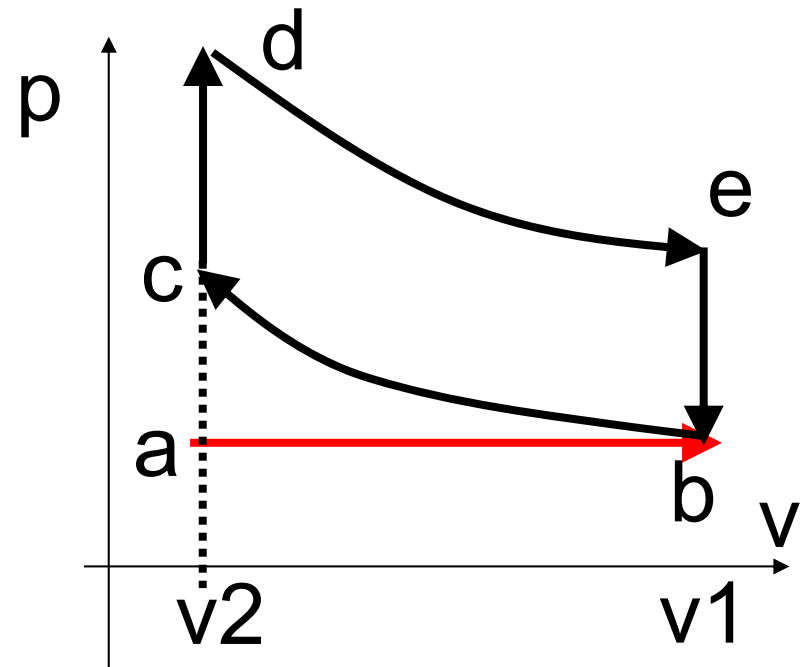


$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$
$$= 1 - \frac{1}{\frac{T_2}{T_1}} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}$$

压缩比 $\frac{V_1}{V_2} = r$

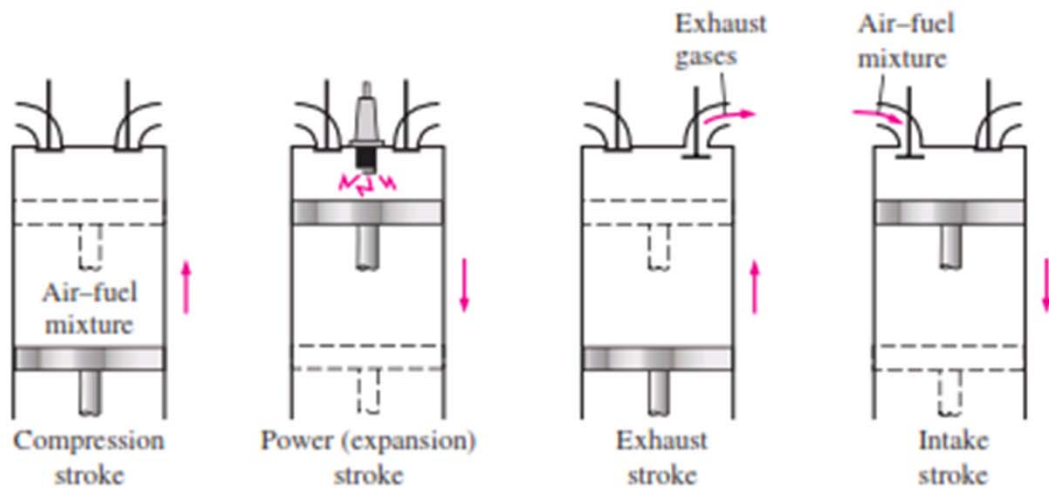
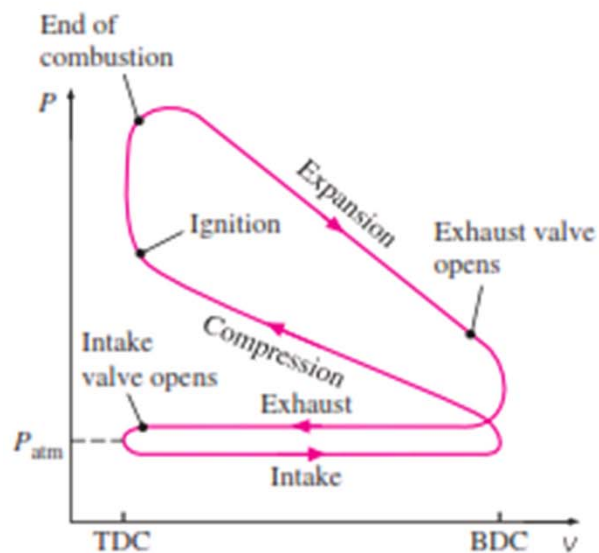
空气 $\gamma = 1.4$, $r < 7$

$$\eta = 1 - \frac{1}{(7)^{0.4}} = 55\%$$

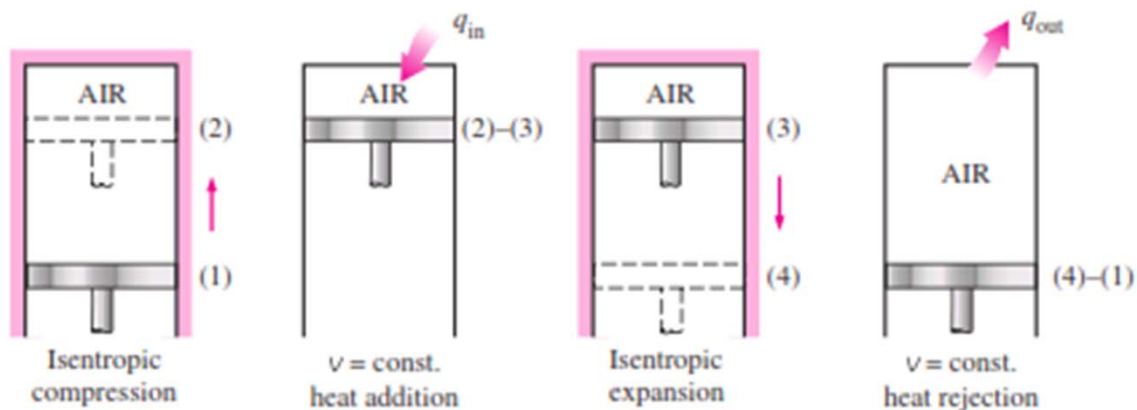
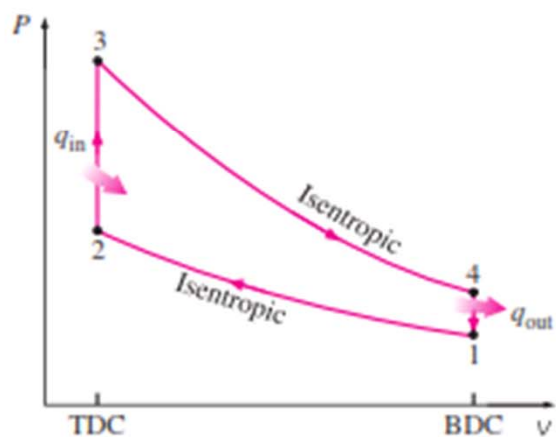


而实际的效率只有25%左右

奥托过程



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine

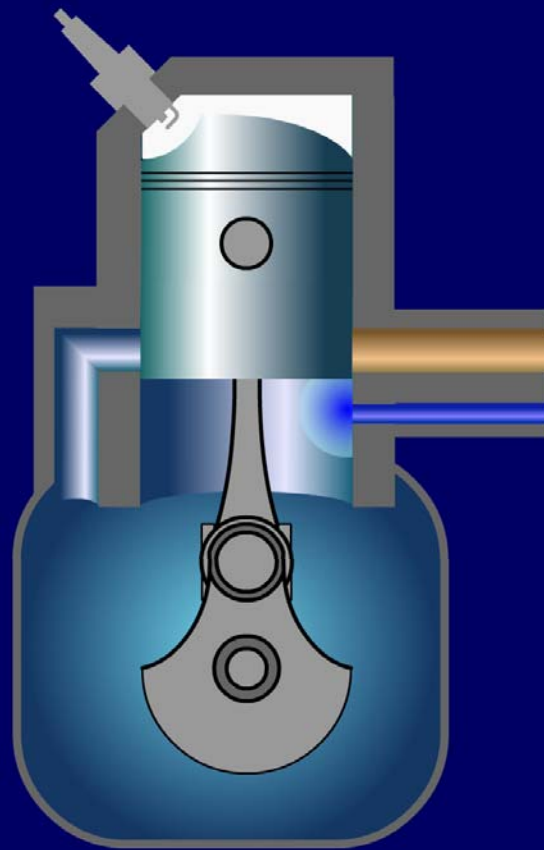


(b) Ideal Otto cycle

奥托过程

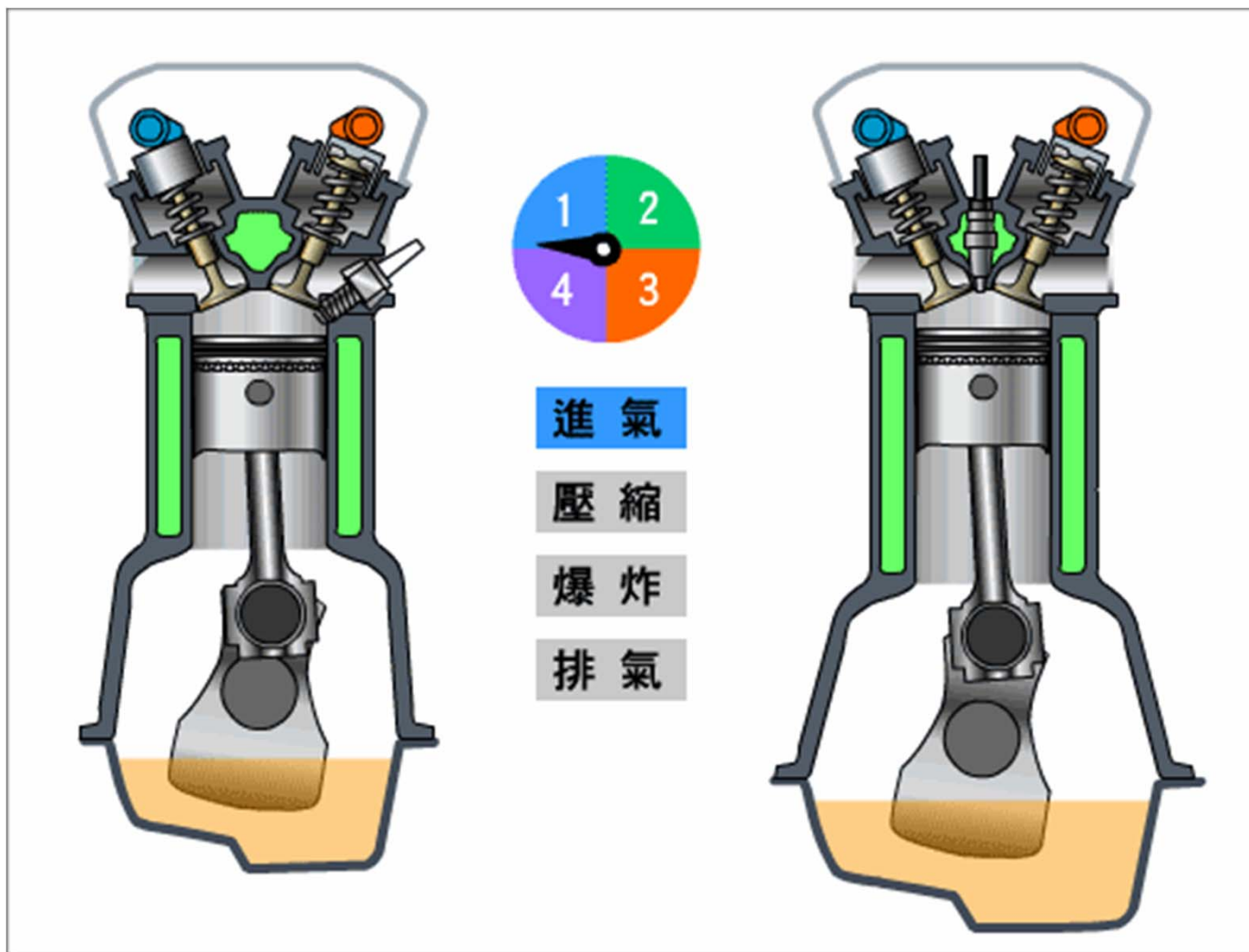


Two Stroke Internal Combustion Engine



两冲程 <http://science.sbccc.edu/~physics/flash/heatengines/2stroke.html>

汽油机 VS 柴油机



卡诺循环



法国, 卡诺, 1796-1832

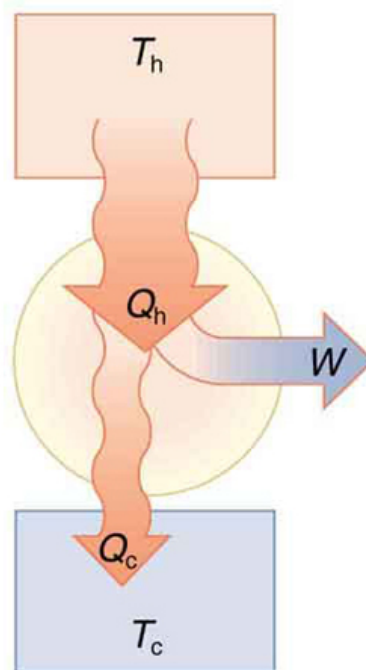
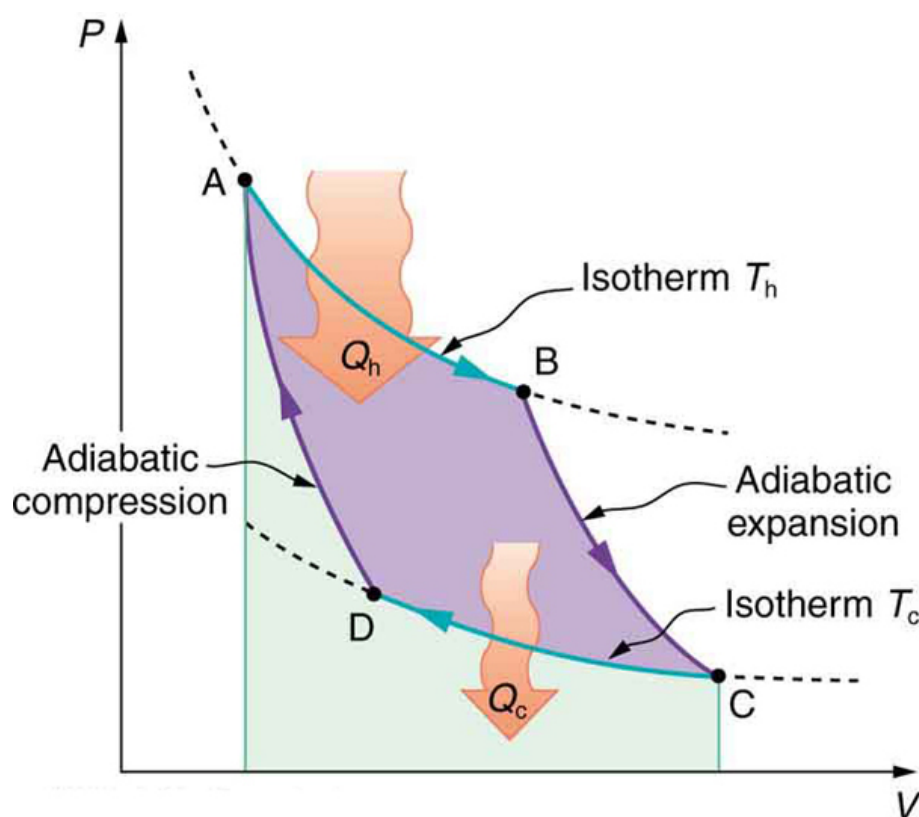
第一个把热和动力联系起来的人, 是热力学的真正的理论基础建立者。



卡诺循环



卡诺循环：工质只和两个恒温热库交换热量的准静态、无摩擦循环。



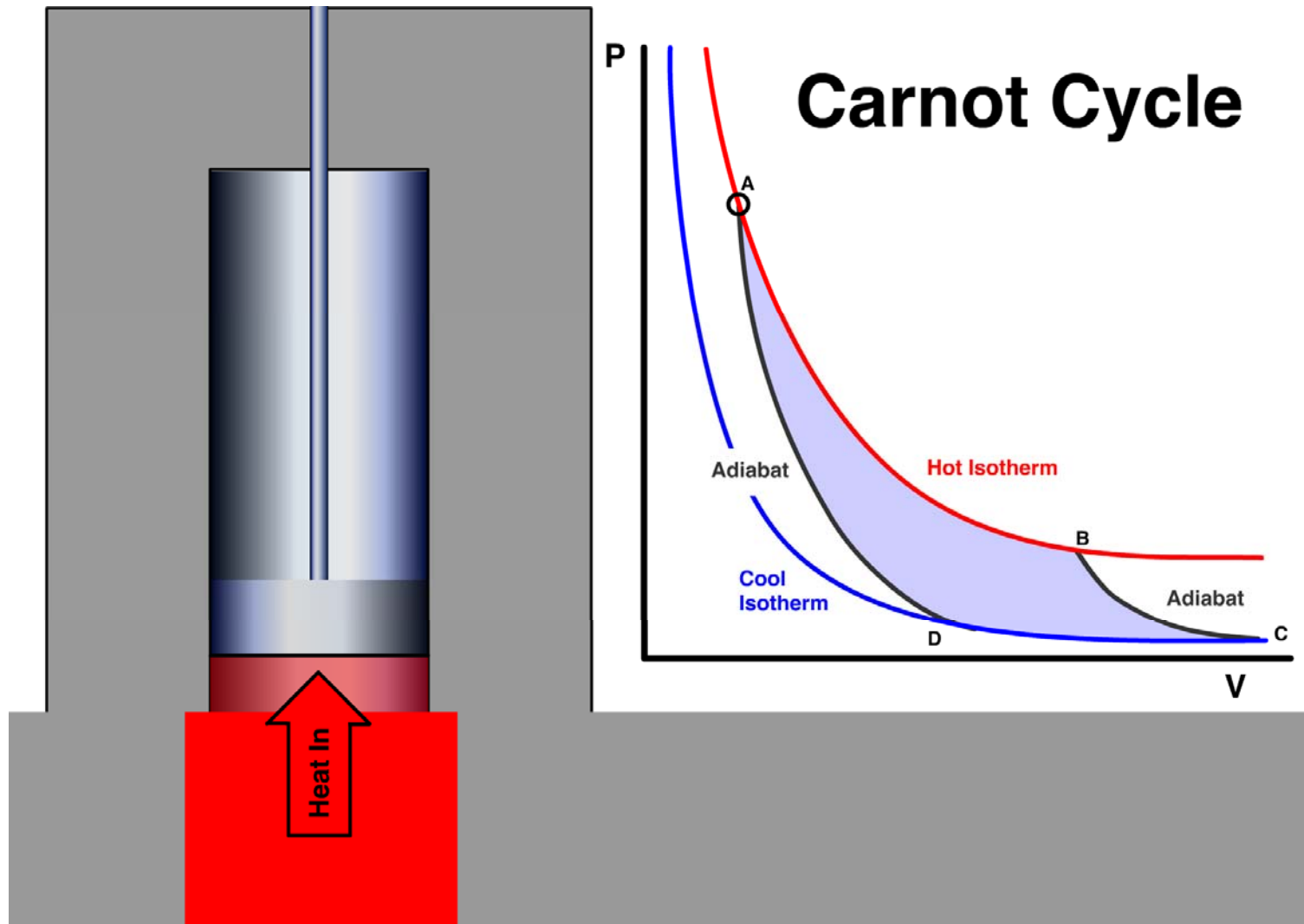
A-B 高温接触
等温膨胀

B-C 离开热源
绝热膨胀

C-D 低温接触
等温压缩

D-A 离开热源
绝热压缩

卡诺循环



<http://science.sbccc.edu/~physics/flash/heatengines/Carnot%20cycle.html>

卡诺循环



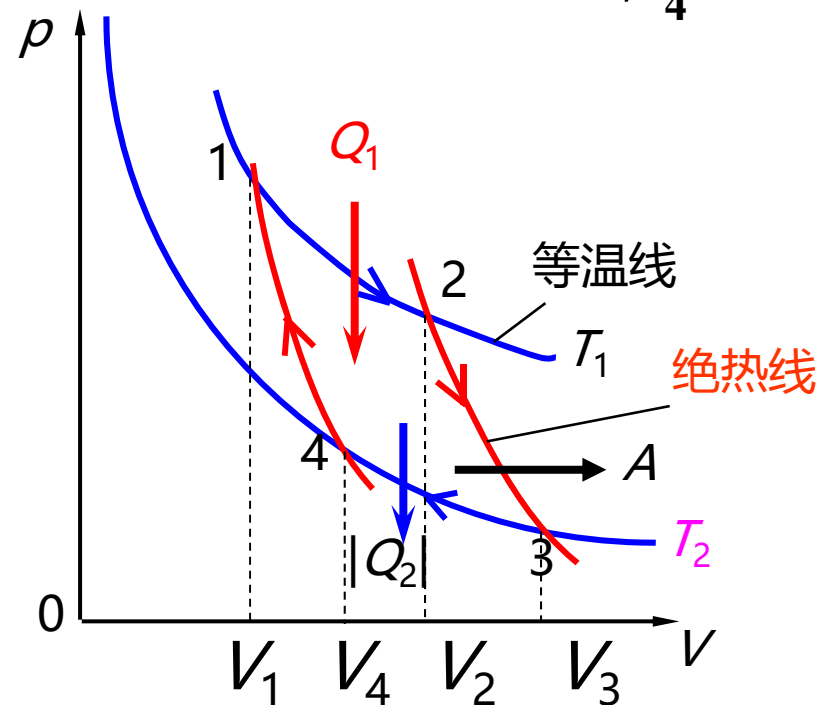
对理想气体工质：

等温

过程

$$1 \rightarrow 2: Q_1 = A_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$
$$3 \rightarrow 4: |Q_2| = |A_2| = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$



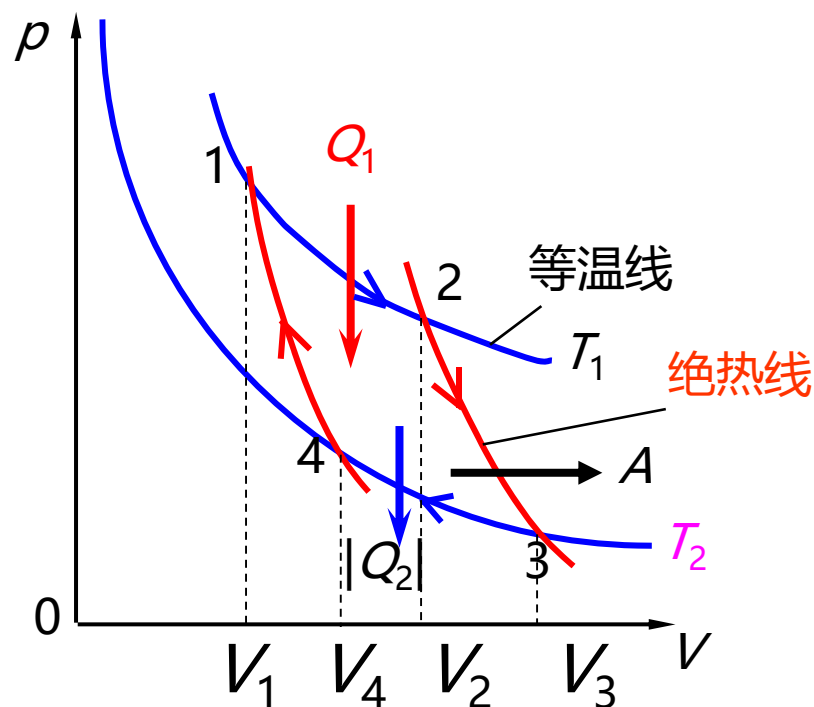
卡诺循环



对理想气体工质:

$$\eta_c = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

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



绝热
过程

$$\left. \begin{array}{l} 2 \rightarrow 3: T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \\ 4 \rightarrow 1: T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1} \end{array} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (\text{闭合条件})$$

卡诺热机循环的效率

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

$$T_1 \sim 100^\circ\text{C}, T_2 \sim 30^\circ\text{C}$$

$$\eta_c \sim 19\%$$

$$T_1 \sim 200^\circ\text{C}, T_2 \sim 30^\circ\text{C}$$

$$\eta_c \sim 36\%$$

$$T_1 \sim 300^\circ\text{C}, T_2 \sim 30^\circ\text{C}$$

$$\eta_c \sim 47\%$$

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

$$\eta_c \sim 65\%$$

卡诺热机循环的效率 $\eta_c = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$

说明：① η_c 与燃气种类、 M 、 p 、 V 无关
只与 T_1 、 T_2 有关，热力学温标。

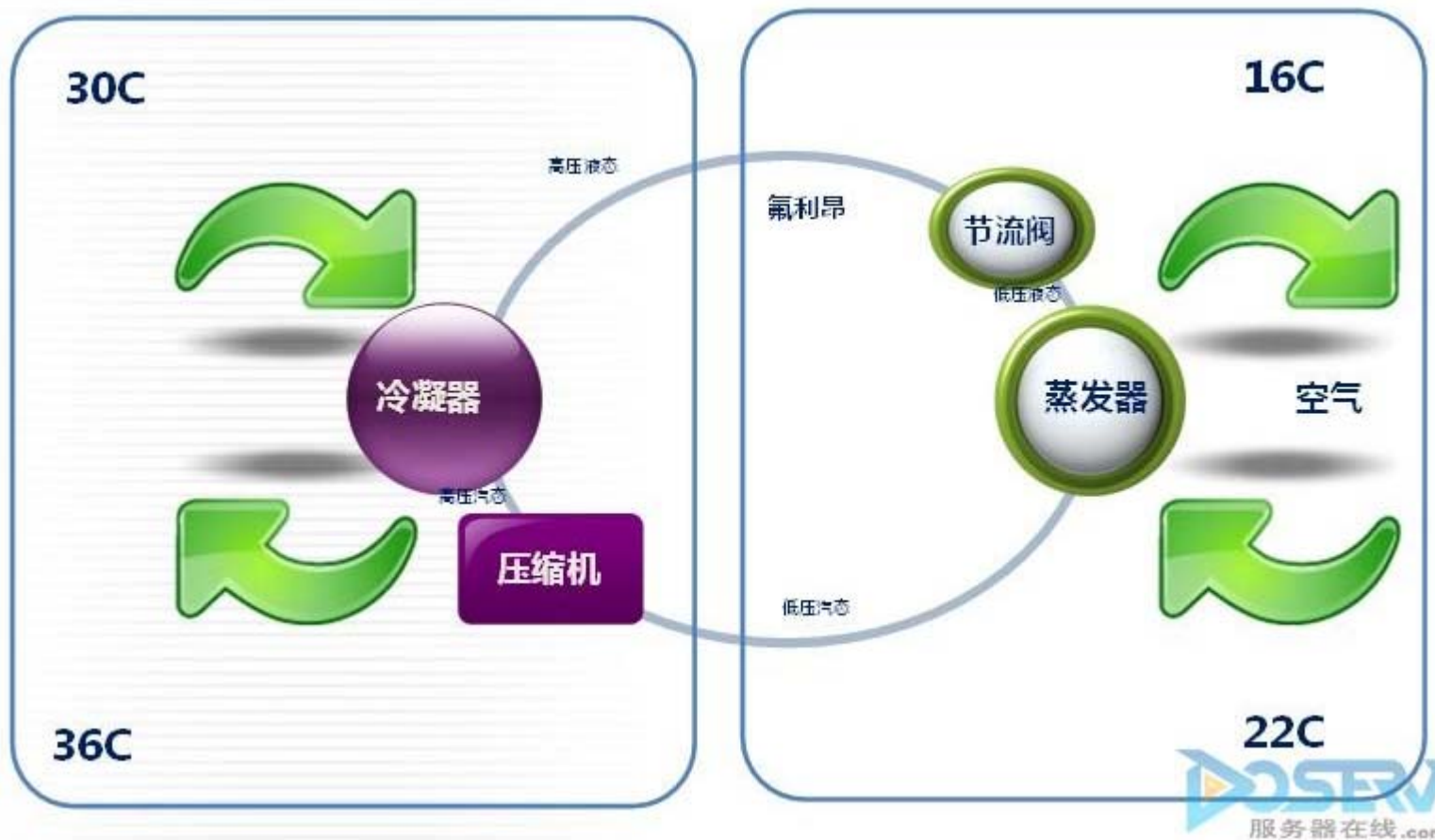
② $T_1 \uparrow$ ， $T_2 \downarrow \rightarrow \eta_c \uparrow$ ，实用上是 $\uparrow T_1$ 。

现代热电厂： $T_1 \sim 600^\circ\text{C}$ ， $T_2 \sim 30^\circ\text{C}$
(873K) (303K)

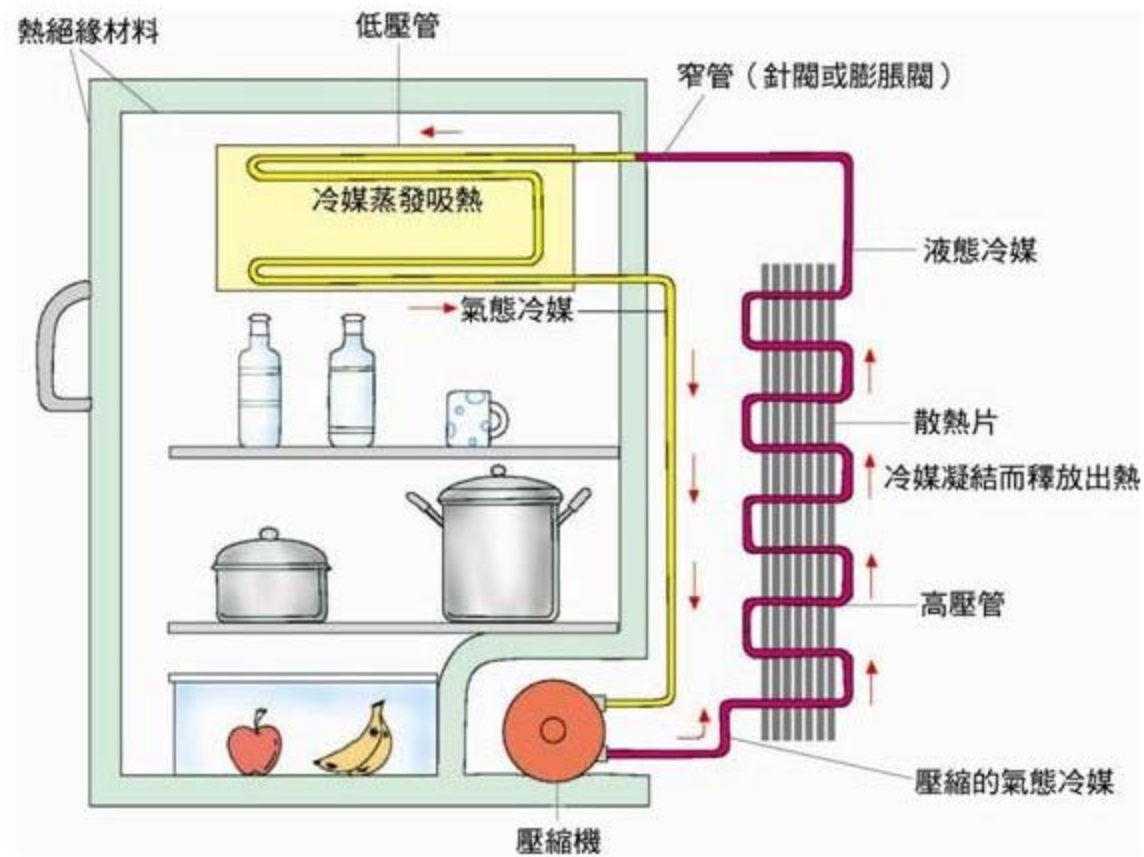
理论上： $\eta_c \sim 65\%$ ，实际： $\eta < 40\%$

原因：非卡诺，非准静态，有摩擦。

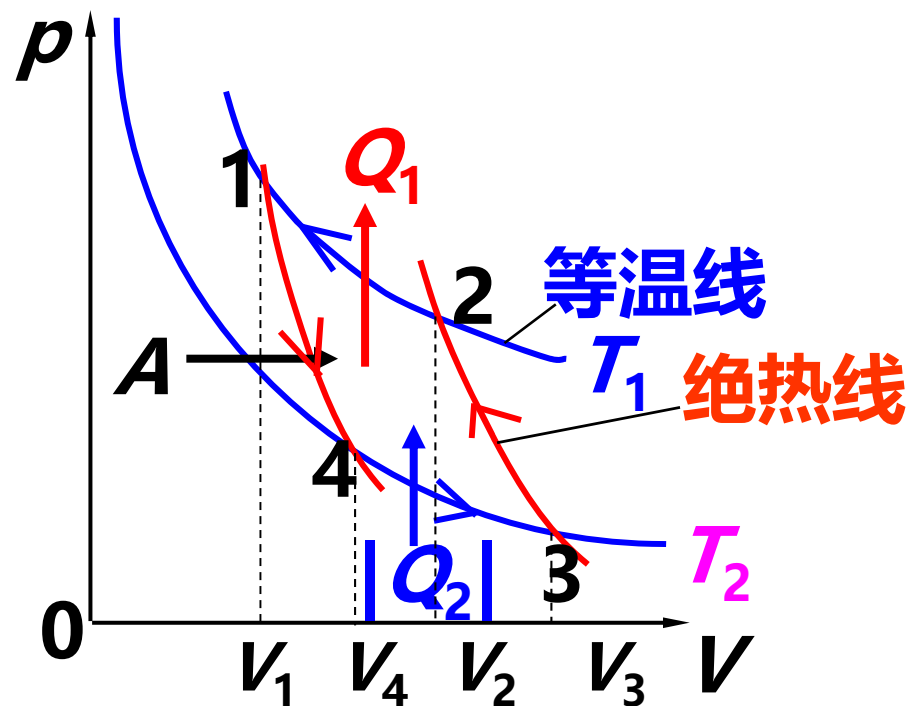
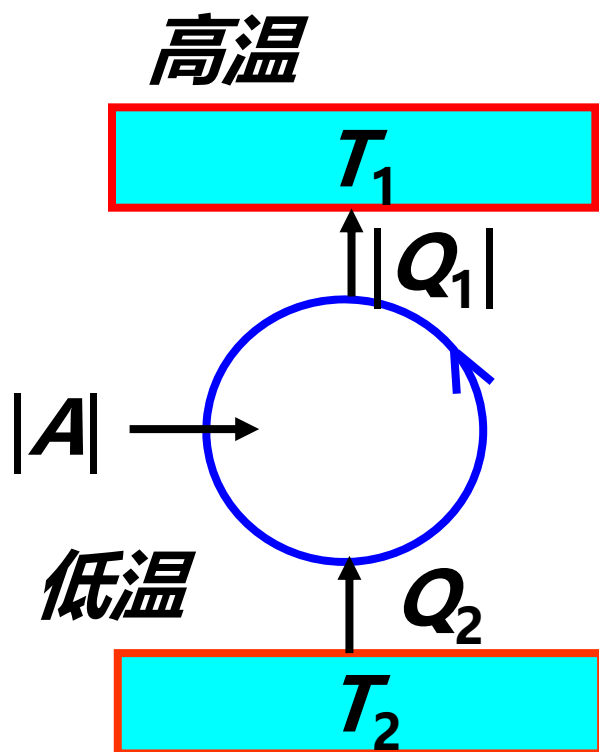
致冷循环



压缩机内流动的F12是在液体状态温度为-20~-30度,0度时为气体,经过压缩可以变成液体.压缩出来后的液体首先到室内机的散热盘管上,在室内机里有一风机,吸收室内的空气,吸收进来的空气经过散热盘管,变冷后通过送风口又回到室内,这样不断对室内的空气进行热交换. 经过室内盘管的F12气体再流向室外机,送到压缩机内压缩.



致冷循环



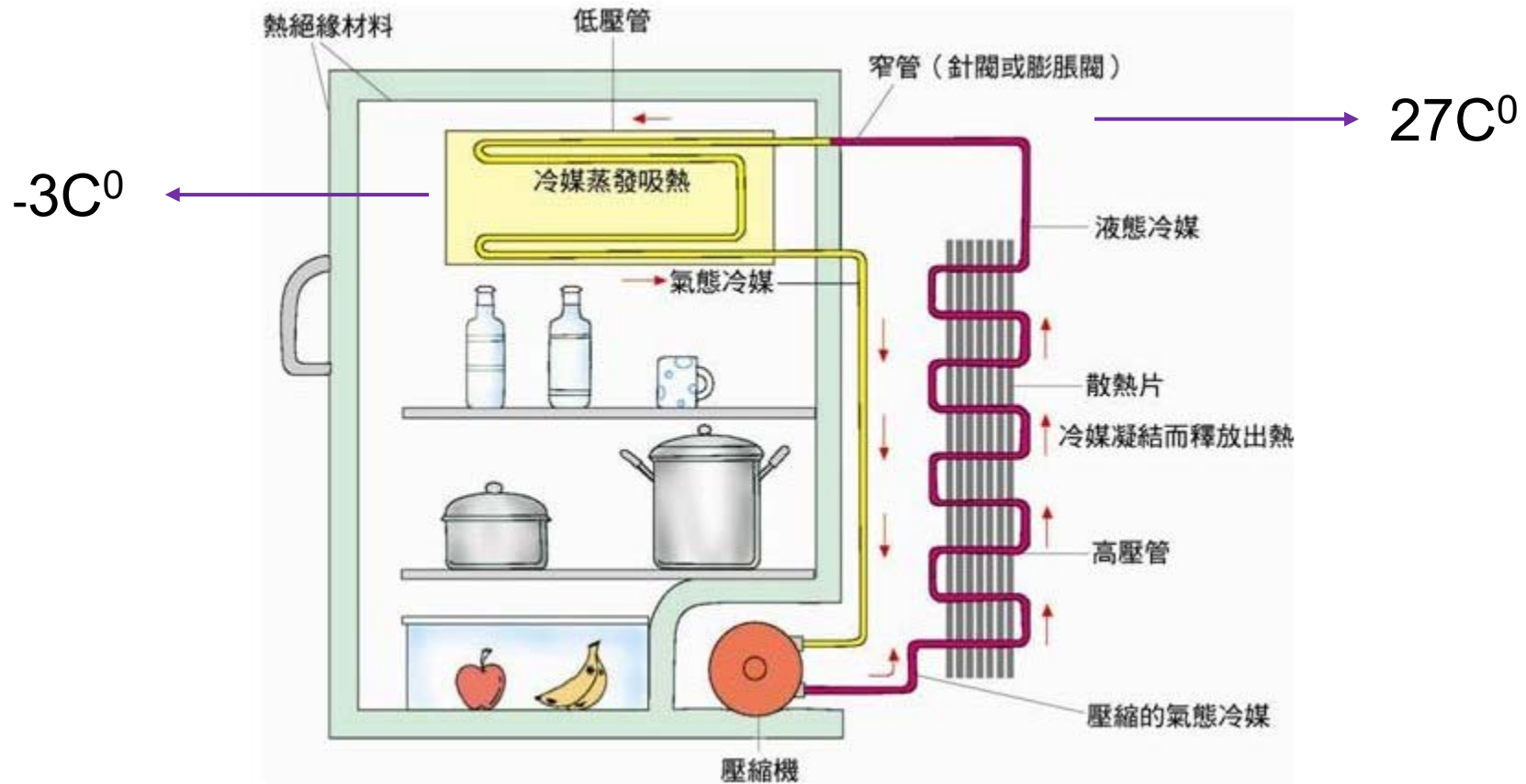
致冷系数

$$w = \frac{Q_2}{|A|}$$

卡诺致冷机

$$w_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

致冷循环



$$w_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{270}{300 - 270} = 9$$