第四章 习题1

P.130-131

4-1； 4-4； 4-6； 4-7； 4-9；
4-10.

工程热力学与传热学

Engineering Thermodynamics & Heat transfer

第四章　气体的热力过程

同济大学机械与能源工程学院
吴家正

目 录

4.1 理想气体的基本热力过程

4.1.1 气体基本热力过程

1.研究热力过程的目的、方法

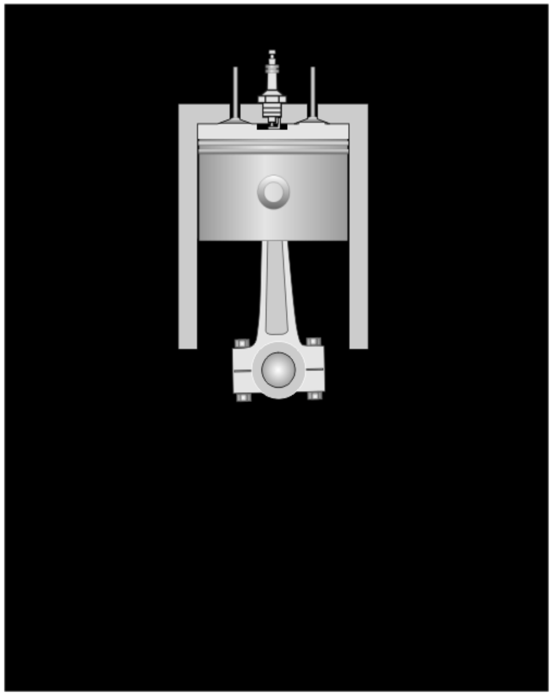
- 目的

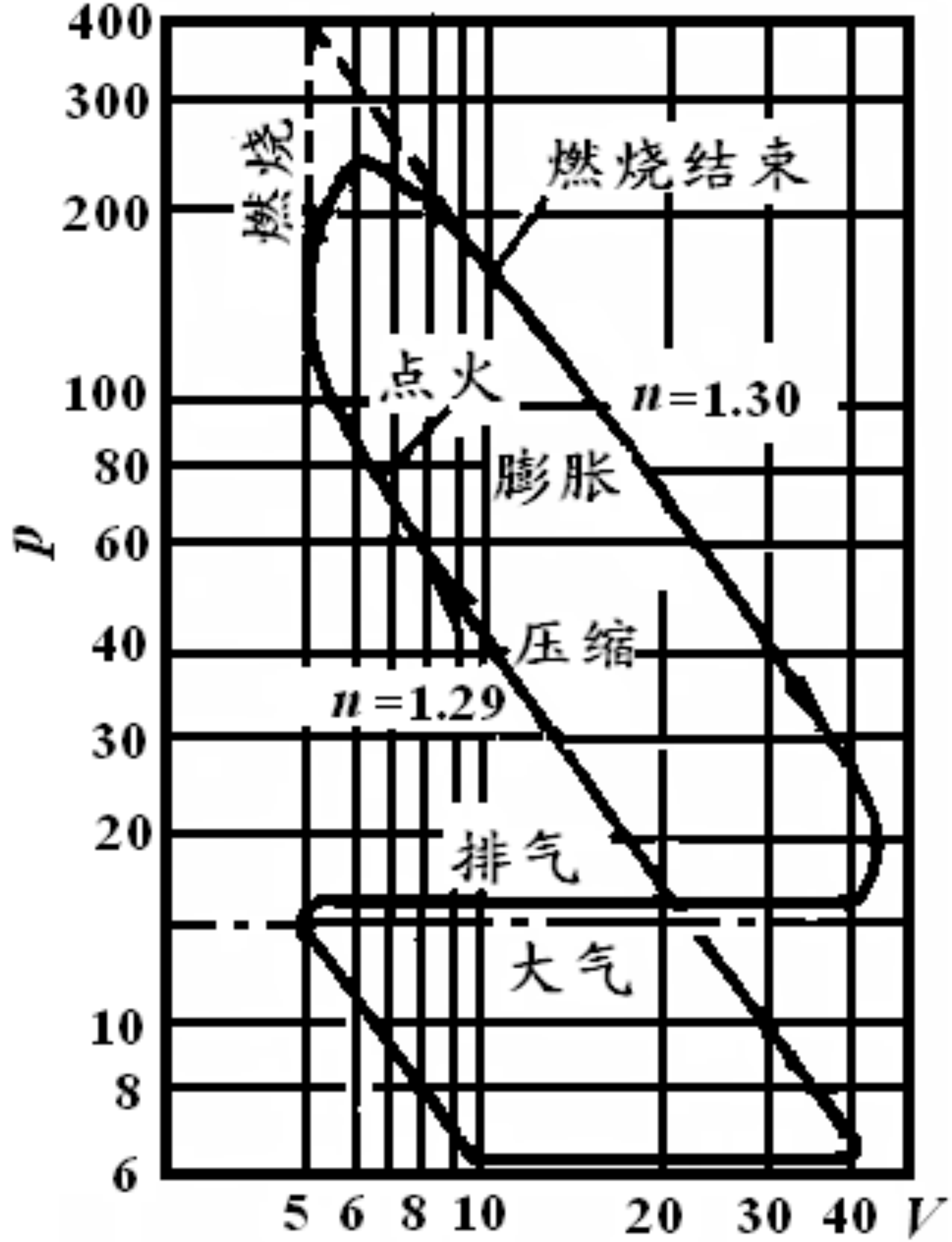
　　以热力学第一定律为基础，分析可逆的基本热力过程中能量转换、传递关系，揭示过程中工质状态参数的变化规律及热量和功量的计算。

- 方法和手段

  - 求出过程方程及计算各过程初终态参数。$p, v, T, \triangle u, \triangle h$
  - 根据热力学第一定律及气体性质计算过程中功和热。w, w_t, q
  - 画出过程p-v及T-s图，分析过程中参数及能量关系。

2.基本热力过程的过程方程

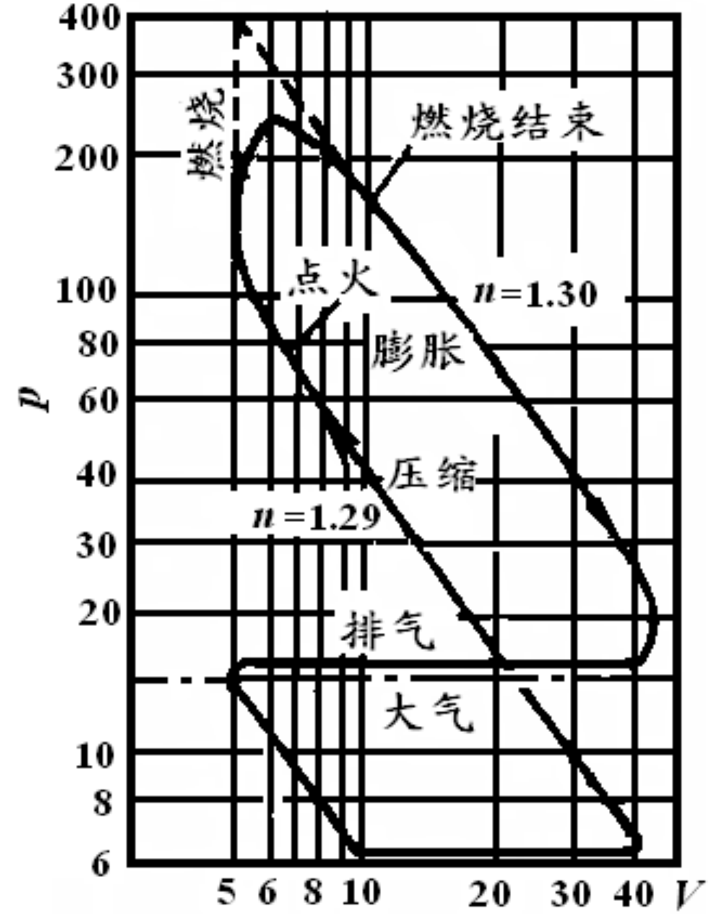




在$\log p$-$\log V$图上有$\log p = -n\ln V + c$

$$\Rightarrow pv^n = \text{常数}$$

$n = 0$	$p = C$	定压过程
$n = 1$	$pv = C$	定温过程
$n = \kappa$	$pv^{\kappa} = C$	定熵过程
$n = \pm\infty$	$v = C$	定容过程
n=任意值	$pv^n = C$	多变过程



4.1.2 理想气体多变过程

1. 过程方程及其初终态状态参数计算

$$\frac{v_1^{\ n}}{v_2^{\ n}}=\frac{p_2}{p_1}$$

$$\boxed{p_1 v_1^{\ n}=p_2 v_2^{\ n}} \Rightarrow p_1 v_1 v_1^{\ n-1}=p_2 v_2 v_2^{\ n-1} \Rightarrow \boxed{T_1 v_1^{\ n-1}=T_2 v_2^{\ n-1}} \Rightarrow$$

$$pv=R_g T$$

$$\boxed{T_1 p_1^{-\frac{n-1}{n}}=T_2 p_2^{-\frac{n-1}{n}}}$$

★定容过程（*v*=常数） $n=\pm\infty \qquad v_1=v_2$

$$v_1=\frac{R_g T_1}{p_1} \qquad v_2=\frac{R_g T_2}{p_2} \qquad \frac{p_1}{T_1}=\frac{p_2}{T_2}$$

★定压过程（*p*=常数） $n=0 \qquad p_1=p_2$

$$p_1=\frac{R_g T_1}{v_1} \qquad p_2=\frac{R_g T_2}{v_2} \qquad \frac{v_1}{T_1}=\frac{v_2}{T_2}$$

$$p_1 v_1^{\ n} = p_2 v_2^{\ n}$$

★**定温过程** $n = 1 \qquad T_1 = T_2$

$$T_1 = \frac{p_1 v_1}{R_g} \qquad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} \qquad p_1 v_1 = p_2 v_2$$

★**定熵(可逆绝热)过程**

$$T\mathrm{d}s = \delta q \ = \mathrm{d}h - v\mathrm{d}p \ = 0 \Rightarrow v\mathrm{d}p = \mathrm{d}h \ = c_p \mathrm{d}T \quad (A)$$

$$T\mathrm{d}s = \delta q \ = \mathrm{d}u + p\mathrm{d}v = 0 \Rightarrow -p\mathrm{d}v \ = \mathrm{d}u \ = c_V \mathrm{d}T \quad (B)$$

$$(A)\div(B) \qquad \kappa = -\frac{v}{p}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}v} \Rightarrow \frac{\mathrm{d}p}{p} + \kappa\frac{\mathrm{d}v}{v} = 0$$

取定比热容，积分 $\ln p + \ln v^{\kappa} = c \Rightarrow pv^{\kappa} = c$

$$p_1 v_1^{\kappa} = p_2 v_2^{\kappa} \Rightarrow p_1 v_1 v_1^{\kappa-1} = p_2 v_2 v_2^{\kappa-1}$$

$$T_1 v_1^{\ \kappa-1} = T_2 v_2^{\ \kappa-1} \qquad T_1 p_1^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_2 p_2^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

三式适用于：
理想气体、
定比热、
可逆绝热过程。

2. 理想气体的多变过程的热力学能差、焓差、熵差和功及热量计算

$$\Delta u = c_{\mathrm{v}}\Big|_{t_1}^{t_2}(T_2 - T_1) = c_{\mathrm{v}}(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = c_{\mathrm{p}}\Big|_{t_1}^{t_2}(T_2 - T_1) = c_{\mathrm{p}}(T_2 - T_1)$$

定比热容

$$\Delta s = c_{\mathrm{p}} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_{\mathrm{g}} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$= c_{\mathrm{v}} \ln \frac{T_2}{T_1} + R_{\mathrm{g}} \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$= c_{\mathrm{v}} \ln \frac{p_2}{p_1} + c_{\mathrm{p}} \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$w = \int_1^2 p\,\mathrm{d}v \qquad w_{\mathrm{t}} = -\int_1^2 v\,\mathrm{d}p$$

$$q = \int_1^2 T\,\mathrm{d}s$$

$$q = \Delta u + w$$

$$q = \Delta h + w_{\mathrm{t}}$$

3. 多变指数

$$p_1 v_1^{\,n} = p_2 v_2^{\,n} \Rightarrow \ln p_1 + n \ln v_1 = \ln p_2 + n \ln v_2$$

$$n = \frac{\ln\left(p_2 / p_1\right)}{\ln\left(v_1 / v_2\right)}$$

4. 在p–v图及T–s图上表示

斜率 $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n$ $\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n$

$$pv^n = \mathrm{C} \qquad \frac{\mathrm{d}p}{p} + n\frac{\mathrm{d}v}{v} = 0 \qquad \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n\frac{p}{v}$$

$$T\mathrm{d}s = \delta q = c_n \mathrm{d}T \qquad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{T}{c_n}$$

c_n称为多变比热容 $c_n = \dfrac{n-\kappa}{n-1} c_{\mathrm{v}}$

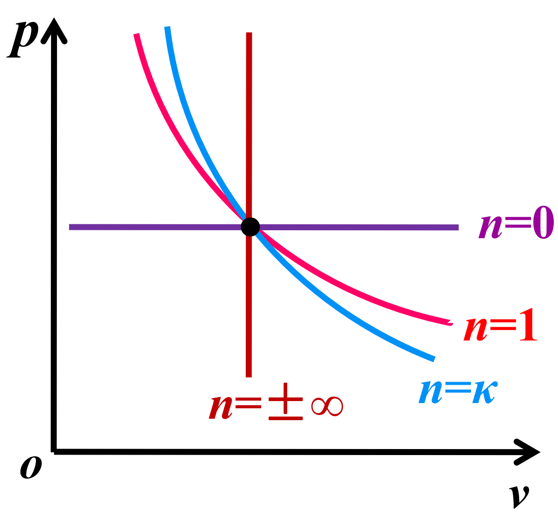
$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n\frac{p}{v} \qquad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{T}{c_n} \qquad c_n = \frac{n-\kappa}{n-1}c_{\mathrm{v}}$$

★定容过程： $n = \pm\infty \quad \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{\mathrm{v}} = \pm\infty \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_{\mathrm{v}} = \frac{T}{c_{\mathrm{v}}}$

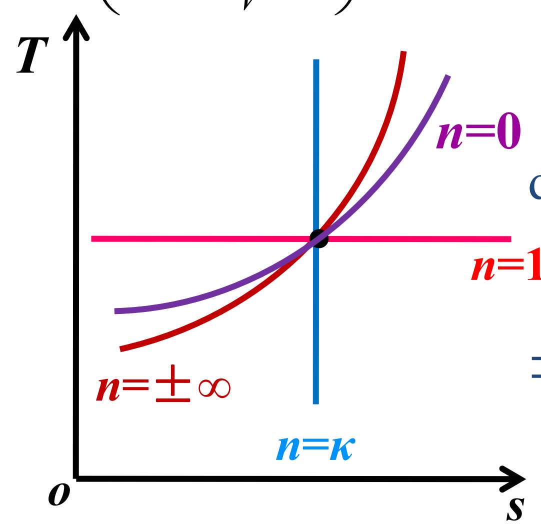
★定压过程： $n = 0 \quad \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{\mathrm{p}} = 0 \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_{v} = \frac{T}{c_{\mathrm{p}}}$

★定温过程： $n = 1 \quad \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{\mathrm{T}} = -\frac{p}{v} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_{\mathrm{T}} = \frac{T}{c_{\mathrm{T}}} \Rightarrow 0$

★定比熵过程（可逆绝热） $n = \kappa \quad \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{\kappa} = -\kappa\frac{p}{v}\left(= -\frac{c_p}{c_V}\frac{p}{v}\right) \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_{\kappa} = \frac{T}{c_{\mathrm{s}}} = \infty$



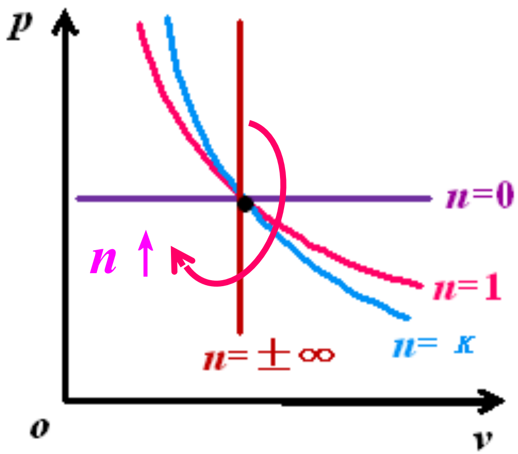
$$pv^n = C$$

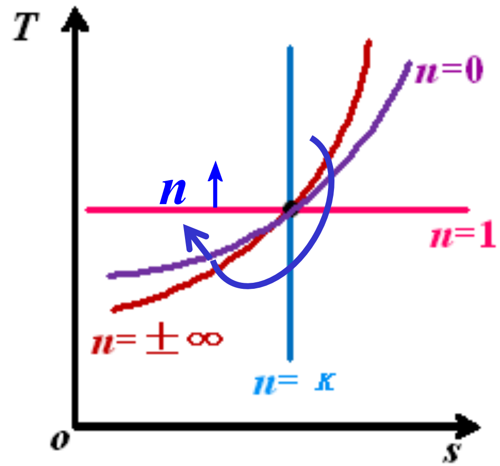


$$\mathrm{d}s = \frac{\delta q}{T} = c_n\frac{\mathrm{d}T}{T}$$

$$\Rightarrow T = e^{\frac{s-s_0}{c_n}}$$

★多变过程 $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n\frac{p}{v}$ $\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{T}{c_n} = \frac{T}{\frac{n-\kappa}{n-1}c_V}$

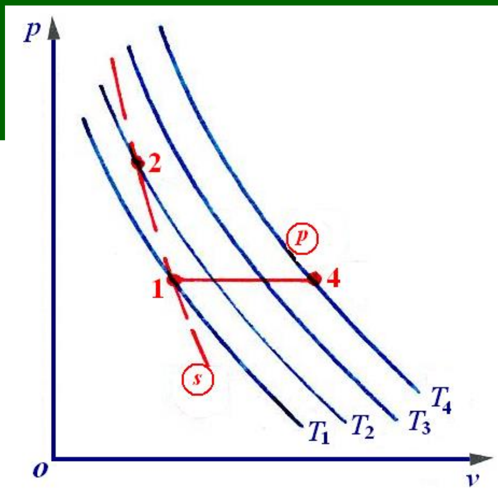


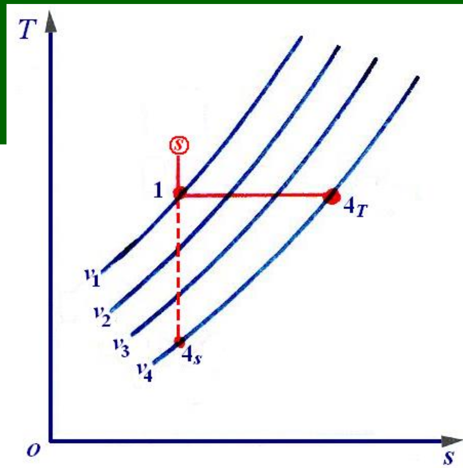


★在实际工程中，**更多关注的是过程在T–s图及p–v图上走向**

① 在p–v 图上确定 T 增大及 s 增大方向

在T–s 图上确定 p 增大及 v 增大方向





在p-v图上利用特殊过程的特性确定T、s方向，如上图

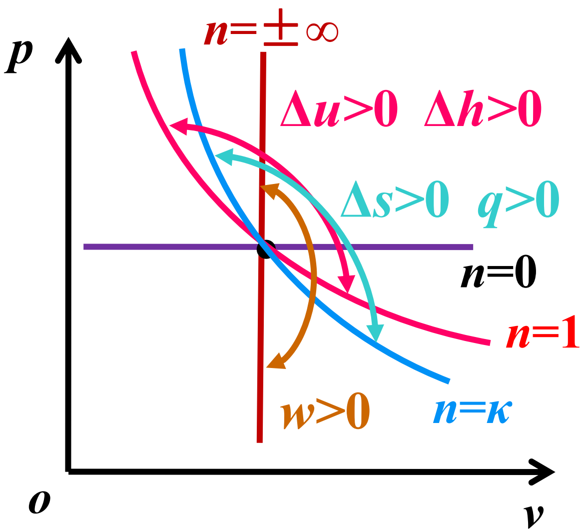
$$p_1 = p_4 \qquad \frac{v_4}{T_4} = \frac{v_1}{T_1} \qquad \Rightarrow T_4 > T_1$$

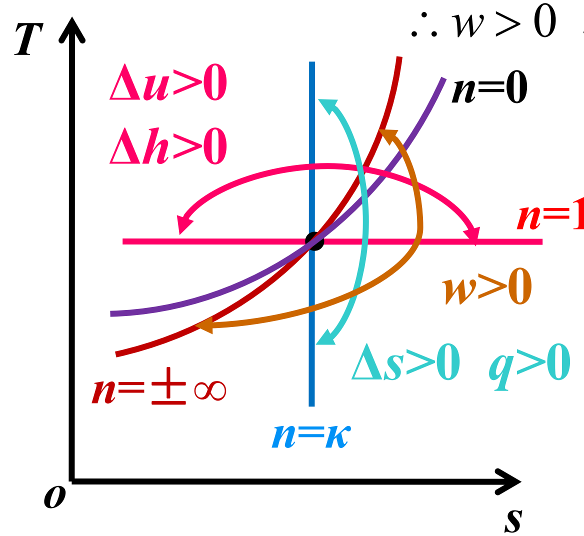
在T-s图上利用过程的能量关系确定p、v的方向，如上图

$$T_1 = T_4 \qquad q = \underbrace{\cancel{\Delta u}}_{0} + w$$

$\because s_4 > s_1$ 根据 $\mathrm{d}s = \dfrac{\delta q}{T}$，$\delta q > 0$,

$\therefore w > 0$ 即 $\mathrm{d}v > 0$，$v_4 > v_1$





在P.104图4-2中的变化要熟记

4.2.1 理想气体基本过程的膨胀功和技术功

1. 多变过程的膨胀功和技术功

$$p_1 v_1^n = p v^n \text{ 得 } p = \frac{p_1 v_1^n}{v^n}$$

$$w = \int_1^2 p\,\mathrm{d}v = p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{\mathrm{d}v}{v^n} = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$$

$$= \frac{1}{n-1} R_g [T_1 - T_2] = \frac{R_g T_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{R_g T_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right]$$

$$T_1 p_1^{-\frac{n-1}{n}} = T_2 p_2^{-\frac{n-1}{n}}$$

$$w_{\mathrm{t}} = -\int_1^2 v\mathrm{d}p = \cdots = \frac{nR_{\mathrm{g}}}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{nR_{\mathrm{g}}T_1}{n-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$= \frac{R_{\mathrm{g}}T_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right] = \frac{nR_{\mathrm{g}}T_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}\right]$$

$$\boxed{w_{\mathrm{t}} = nw}$$

2. 可逆绝热过程的膨胀功和技术功

$$q = \Delta u + w$$

O

$$w = -\Delta u = u_1 - u_2 = c_{\mathrm{v}}(T_1 - T_2) = \frac{R_{\mathrm{g}}T_1}{\kappa-1}\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = \frac{R_{\mathrm{g}}T_1}{\kappa-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]$$

$$= \frac{R_{\mathrm{g}}T_1}{\kappa-1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}\right]$$

$$w = \frac{1}{\kappa - 1} R_g (T_1 - T_2) = \frac{R_g T_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] = \frac{R_g T_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}\right]$$

同样

$$q = \Delta h + w_t$$

$$w_t = -\Delta h = h_1 - h_2$$

$$w_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g (T_1 - T_2) = \frac{\kappa R_g T_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] = \frac{\kappa R_g T_1}{\kappa - 1}\left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}\right]$$

$$\boxed{w_t = \kappa w}$$

3. 定容过程的膨胀功和技术功

$$w = \int_1^2 p \mathrm{d}v = 0 \qquad w_\mathrm{t} = -\int_1^2 v \mathrm{d}p = v\left(p_1 - p_2\right)$$

4. 定压过程的膨胀功和技术功

$$w = p\left(v_2 - v_1\right) \qquad w_\mathrm{t} = 0$$

5. 定温过程的膨胀功和技术功

$$w = \int_1^2 p \,\mathrm{d}\, v = \int_1^2 \frac{pv}{v} \mathrm{d}\, v = R_\mathrm{g} T \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$w_\mathrm{t} = -\int_1^2 v \,\mathrm{d}\, p = -\int_1^2 \frac{vp}{p} \mathrm{d}\, p = -R_\mathrm{g} T \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$w_\mathrm{t} = w$$

4.2.2 气体热力过程的热量及多变过程的比热容

1. 热量

$$q=\begin{cases}\Delta u+w=c_V\left(T_2-T_1\right)+\dfrac{R_g}{n-1}\left(T_1-T_2\right)=\dfrac{n-\kappa}{n-1}c_V\left(T_2-T_1\right)\\ c_n\left(T_2-T_1\right)\\ \int_1^2 T\mathrm{d}s\end{cases}$$

2. 多变比热容

$$q=\Delta u+w$$

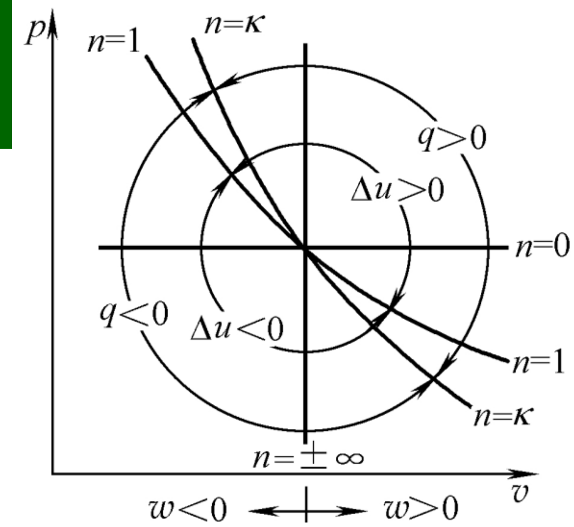
$$=\frac{n-\kappa}{n-1}c_V\left(T_2-T_1\right)$$

$$=c_n\left(T_2-T_1\right)$$

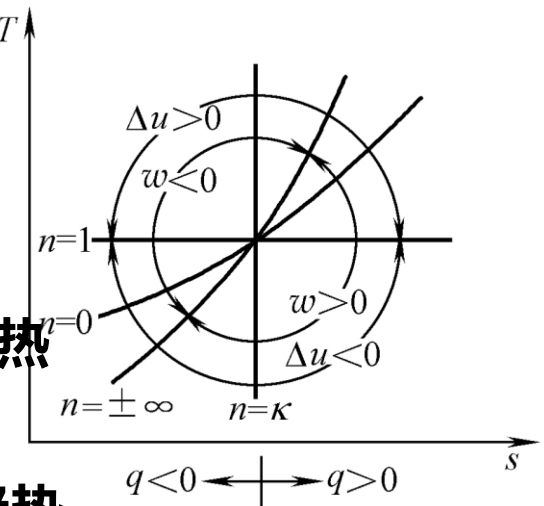
$$c_n=\frac{n-\kappa}{n-1}c_V\begin{cases}n=0 & c_p=\kappa c_V\\ n=1 & c_T\to\infty\\ n=\kappa & c_s\to 0\\ n=\pm\infty & c_V\end{cases}$$

理想气体可逆过程计算公式（定值比热容）汇总于表4-1，P106

4.2.3 多变过程的能量关系



$$\left.\begin{aligned} w &= \frac{R_g}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{\kappa-1}{n-1} c_V (T_1 - T_2) \\ q &= \frac{n-\kappa}{n-1} c_V (T_2 - T_1) \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{w}{q} = \frac{\kappa-1}{\kappa-n}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} n < \kappa \quad \dfrac{\kappa-1}{\kappa-n} > 0 \quad \dfrac{w}{q} > 0 \\ n > \kappa \quad \dfrac{\kappa-1}{\kappa-n} < 0 \quad \dfrac{w}{q} < 0 \end{cases}$$

膨胀，吸热；压缩, 放热

膨胀，放热；压缩, 吸热

$n<\kappa$ 膨胀，吸热；压缩, 放热

$n>\kappa$ 膨胀，放热；压缩, 吸热

例1　　某理想气体经历4个过程，如T-s图。1）将各过程画在p-v图上；2）指出过程吸热或放热，膨胀或压缩。

解：1-3

$$1<n_{1-3}<\kappa \text{且} T_3>T_1 \text{及} s_3<s_1$$

由于$w<0$，$q<0$，故边压缩、边放热

1-2　$\kappa<n_{1-2}<\infty$且$T_2<T_1$及$s_2<s_1$

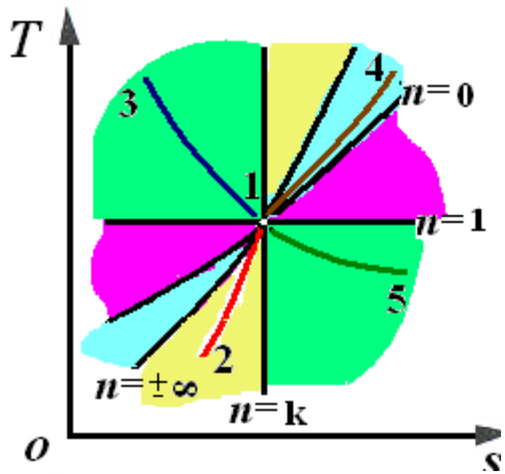
由于$w>0$，$q<0$，故边膨胀、边放热

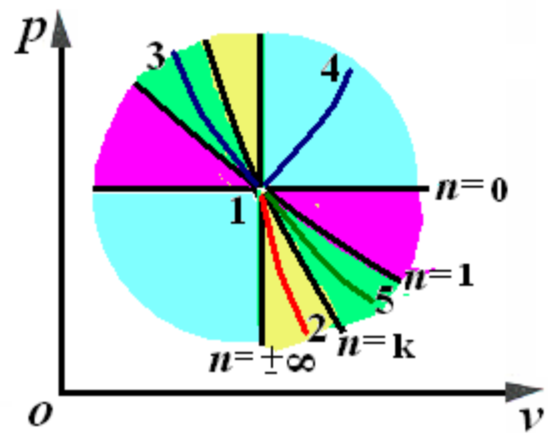
1-4　$0>n_{1-4}>-\infty$且$T_4>T_1$及$s_4>s_1$

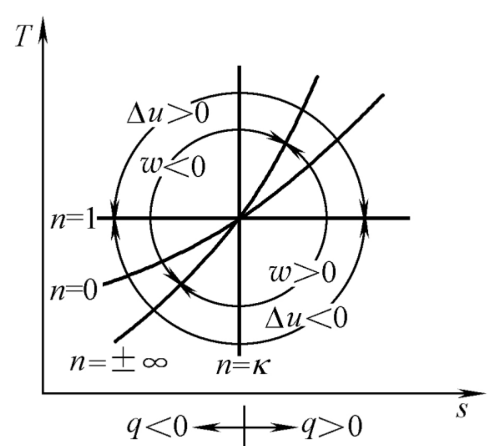
由于$w>0$，$q>0$，故边膨胀、边吸热

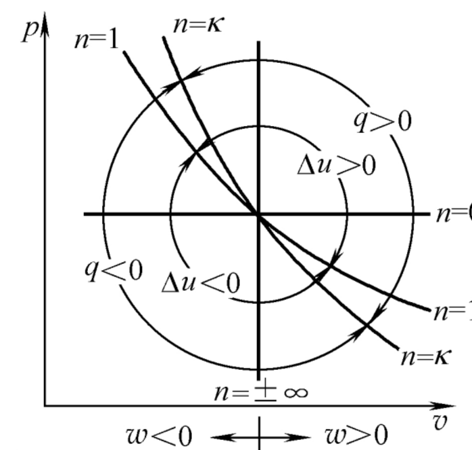
1-5　$1<n_{1-5}<\kappa$且$T_5<T_1$及$s_5>s_1$

由于$w>0$，$q>0$，边膨胀、边吸热、边降温





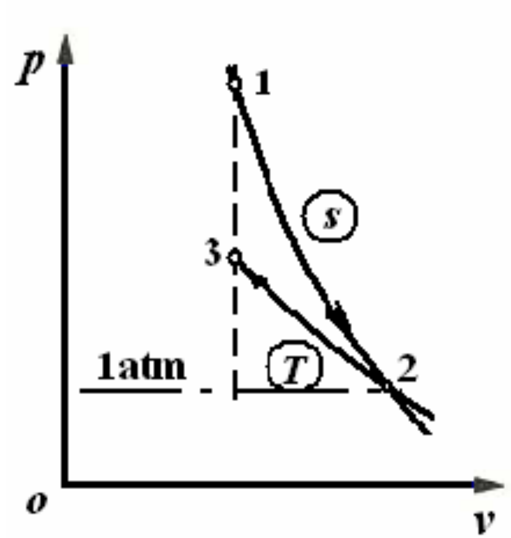


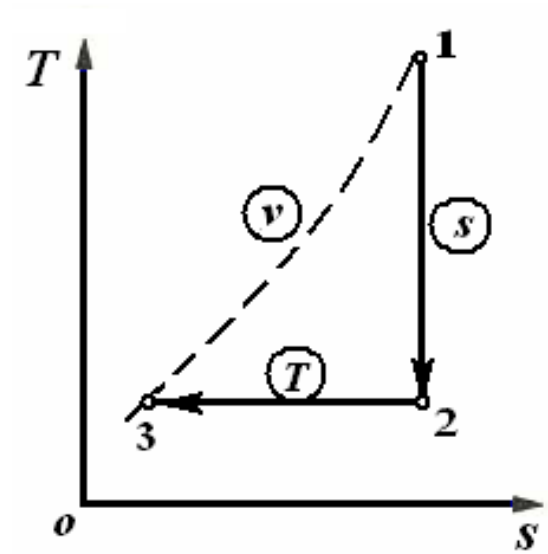


例2　0.5 kmol**某种单原子理想气体，由**25 ℃，2m^3 **可逆绝热膨胀到**1 atm，**然后在此状态的温度下定温可逆压缩回到**2 m^3。1）**画出各过程的***p*-*v***图及***T*-*s***图；**

2）**计算整个过程的***Q*，*W*，Δ*U*，Δ*H* **及**Δ*S*。

解：　1）





2）**先求各状态参数**

$$p_1 = \frac{nRT_1}{V_1} = \frac{500\ \text{mol}\times 8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\left(273+25\right)\ \text{K}}{2\ \text{m}^3}$$

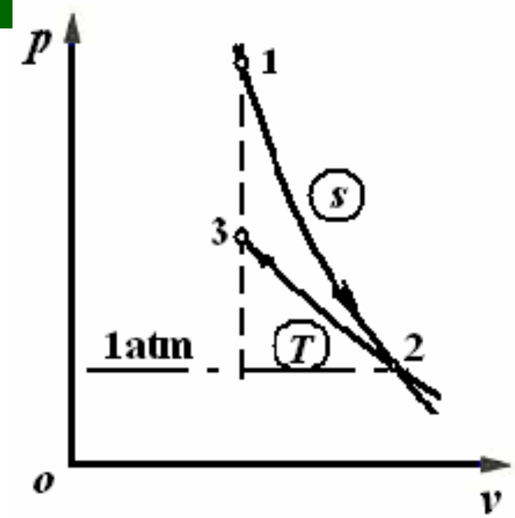
$$= 6.193\ 93\times 10^5\ \text{Pa} = 6.11\ \text{atm}$$

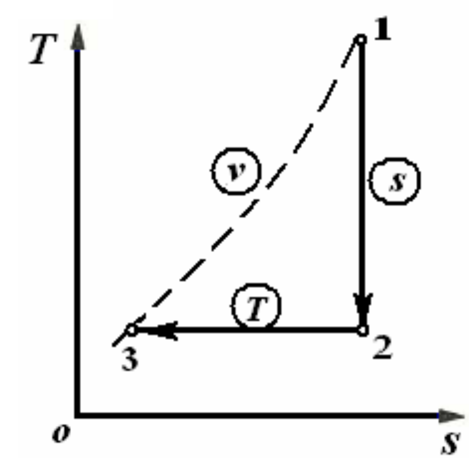
$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 298\text{K}\times\left(\frac{1\text{MPa}}{6.11\text{MPa}}\right)^{\frac{1.67-1}{1.67}} = 144.26\text{K}$$

$$V_2 = V_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = 2\text{m}^3\times\left(\frac{6.11\text{MPa}}{1\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.67}} = 5.906\text{m}^3$$

$$T_3 = T_2 = 144.26\ \text{K} \qquad V_3 = V_1 = 2\ \text{m}^3$$

$$p_3 = \frac{500\ \text{mol}\times 8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 144.26\ \text{K}}{2\ \text{m}^3} = 299\ 855\ \text{Pa}$$





理想气体等温过程： 热量=膨胀功=技术功

$$Q = Q_{1-2} + Q_{2-3} = Q_{2-3} = W_{t\,2-3} = nRT\ln\frac{V_3}{V_2}$$

$$= 500\ \text{mol}\times 8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 144.26\ \text{K}\times\ln\frac{2\ \text{m}^3}{5.906\ \text{m}^3}$$

$$= -649.4\ \text{kJ}$$

放热

$$W = W_{1-2} + W_{2-3} = \left(U_1 - U_2\right) + W_{T\,2-3} = nC_{V\mathrm{m}}\left(T_1 - T_2\right) + nRT\ln\frac{V_3}{V_2}$$

$$= [500\ \mathrm{mol} \times 3 \times 8.314 / 2\ \mathrm{J/(mol \cdot K)} \times (298 - 144.26)\ \mathrm{K}] / 1000$$

$$+ (-649.4)\ \mathrm{kJ} = 309.25$$

$$\Delta U_{1-3} = Q_{1-3} - W_{1-3} = -649.4\ \mathrm{kJ} - 309.25\ \mathrm{kJ} = -958.65\ \mathrm{kJ}$$

$$\Delta H_{1-3} = nc_{\mathrm{p,m}}(T_3 - T_1) = \Delta U_{1-3} + (p_3 - p_1)V_{1-3}$$

$$= -958.65\ \mathrm{kJ} + (299.855 - 619.393)\ \mathrm{kPa} \times 2\ \mathrm{m}^3 = -1597.73\ \mathrm{kJ}$$

$$\Delta S_{1-3} = n\left[c_{\mathrm{v,m}}\ln\frac{T_3}{T_1} + R\ln\frac{V_3}{V_1}\right]$$

$$= [500\ \mathrm{mol} \times 3 \times 8.314 / 2\ \mathrm{J/(mol \cdot K)}] / 1000 \times \ln\frac{144.26\,\mathrm{K}}{298\,\mathrm{K}} = -4.52\ \mathrm{kJ/K}$$

第四章 习题2

P.131-132

4-11；4-12；4-13；4-14.

4.3 压气机的热力过程

4.3.1 压气机概述

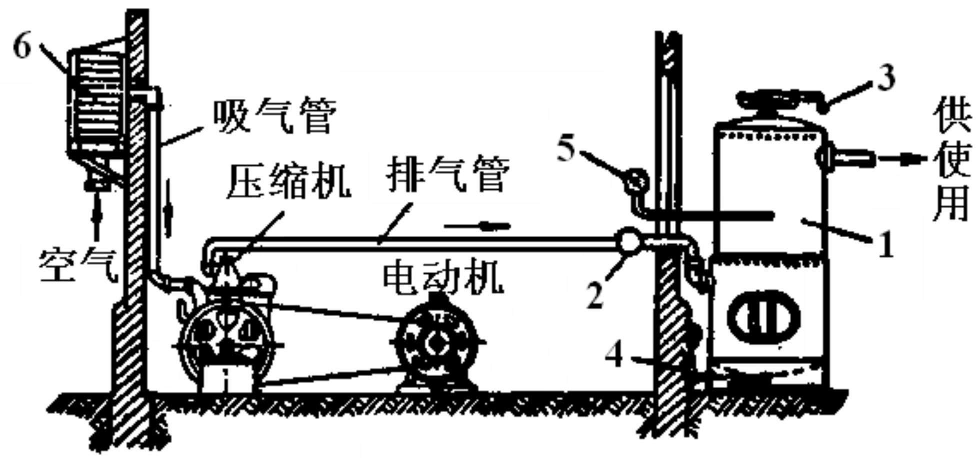
定义：用消耗机械能（功）来生产压缩气体的一种工作机。

动力机、风动工具、制冷工程、化学工业、潜水作业、 医疗、休闲等。

工业上：锅炉鼓风、出口引风、炼钢、燃气轮机、制冷空调等等

压力范围

通风机	＜115kPa
鼓风机	115~350kPa
压缩机	＞350kPa



往复式空气压缩机装置简图

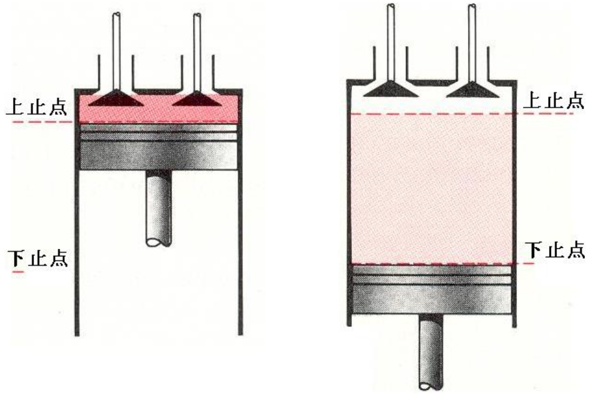
1.储气罐 2.止回阀 3.安全阀 4.泄水阀

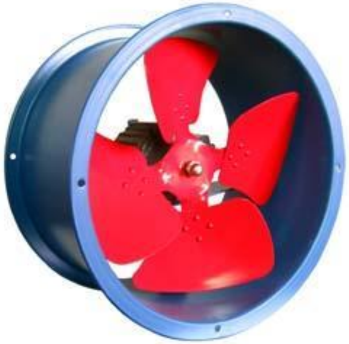
5.压力表 6.空气滤清器

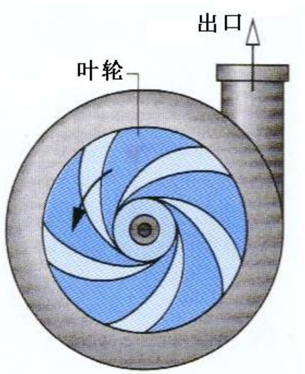
型式结构

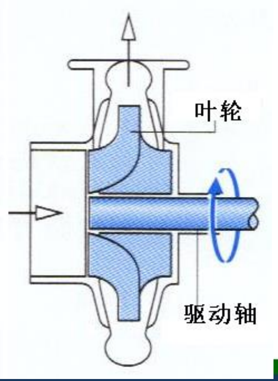
- **活塞式(往复式)** —压头高，流量小，间隙生产。出口当连续流动
- **离心式**
- **轴流式**

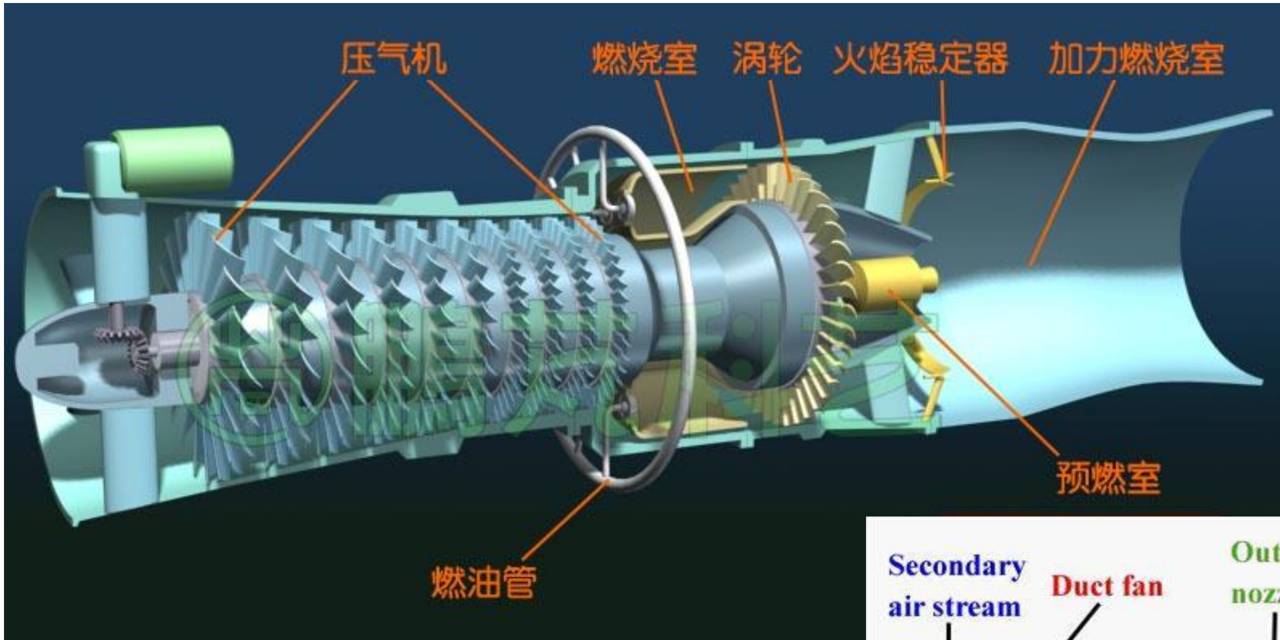
（离心式、轴流式）—压头低，流量大，叶轮式连续流动

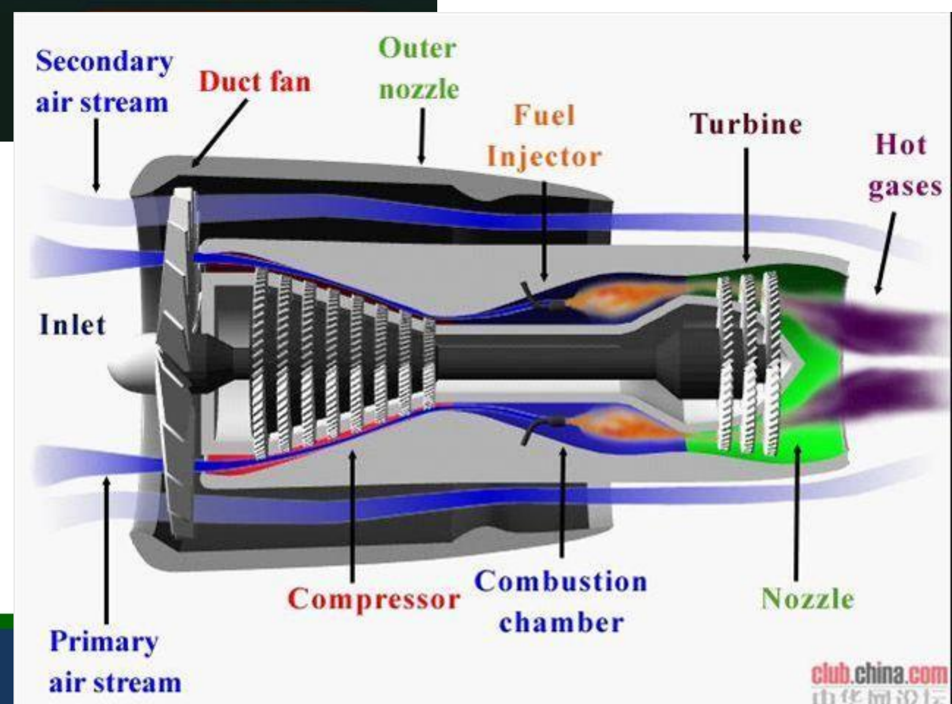






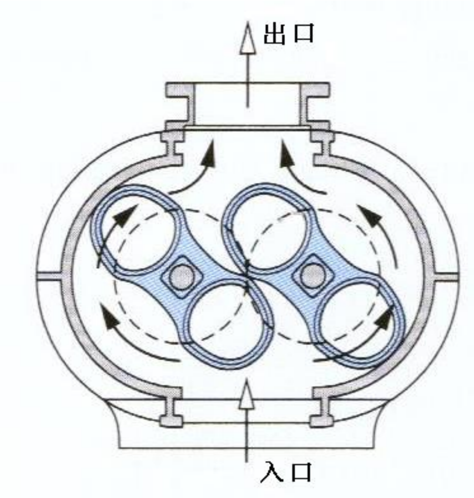


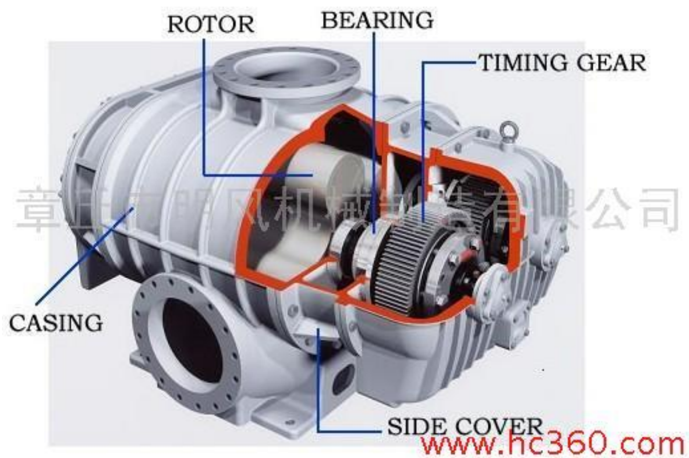


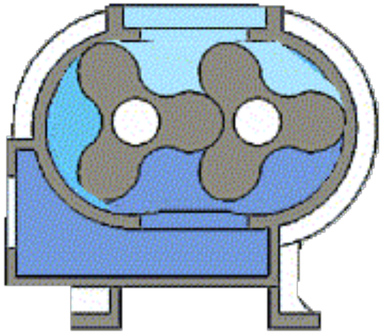


该图片由 www921796008 上传至 Tiexue.Net 图片版权归原创者所有

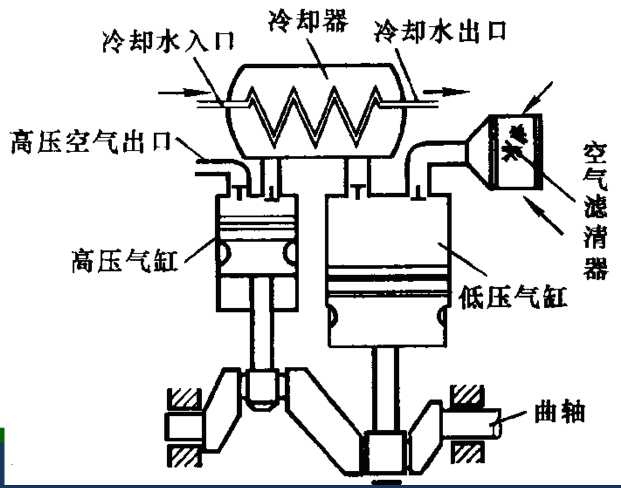
另有容积式回转风机——罗茨式压气机(Roots blower),等等。







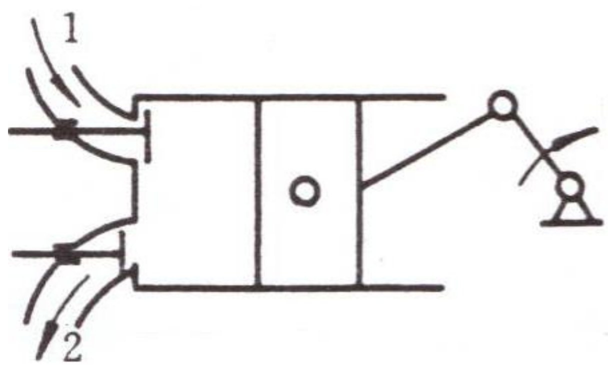
单级压缩，多级压缩



压气机不是动力机，
压气机中进行的过程
不是循环

4.3.2 单级活塞式压气机工作原理

1、工作原理



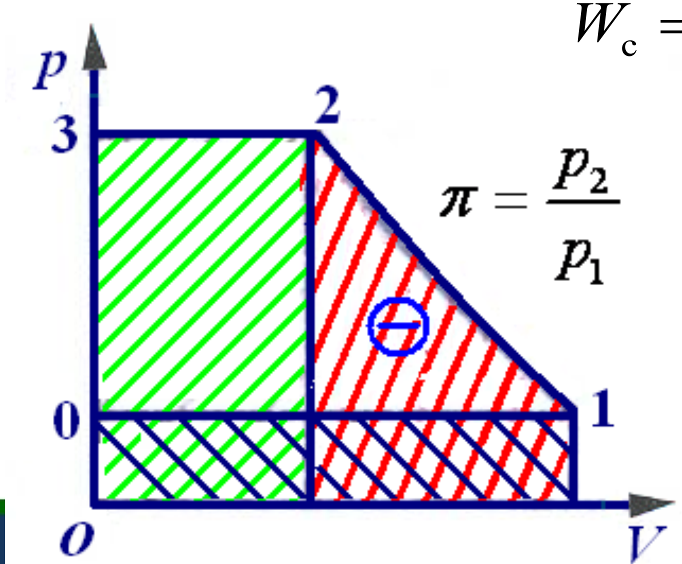
0-1：吸气，传输推动功p_1v_1

1-2：压缩，耗外功

2-3：排气，传输推动功p_2v_2

压气机耗轴功：（$m$kg气体）

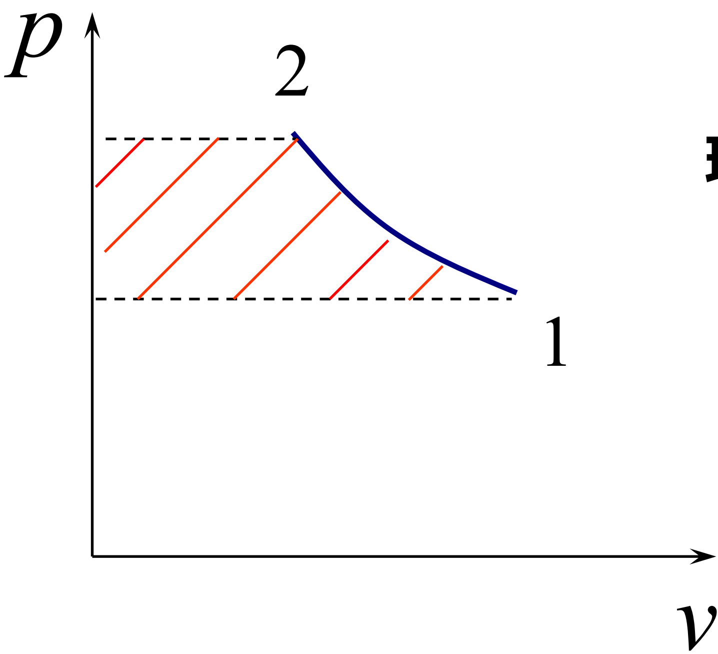
$$W_{\mathrm{c}}=p_1V_1+\int_1^2 p\,\mathrm{d}V-p_2V_2=-\int_1^2 V\,\mathrm{d}p=W_{\mathrm{t}}=W_{\mathrm{s}}$$



注意：1、假设没有余隙存在，压缩过程可逆，无阻力；2、π称为压力比（升压比、增压比）；3、压气机生产量通常用单位时间里生产气体的标准立方米表示；4、如果是单位质量，在P-V图上过程0-1、2-3不能表示。

2、压气机可能的压气过程

目的：研究耗功，越少越好



指什么功 → **技术功 w_t**

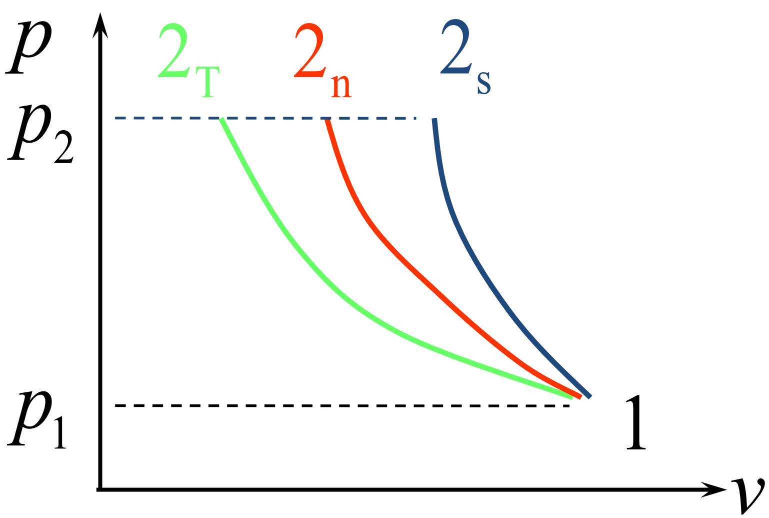
理论压气功(可逆过程)

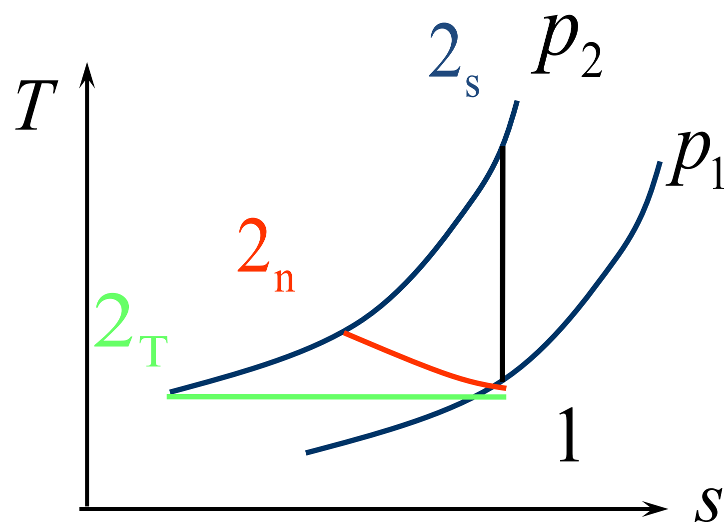
可逆过程是理想的过程，无温差、无压差、无摩擦。

实际过程是有温差、压差、摩擦。因此一定有热量产生

考察同样初终态的比较极端压气过程气体工质的热量产生的情况：

- **特别快，来不及换热。** s $n=k$
- **特别慢，热全散走。** T $n=1$
- **实际压气过程是** n $1<n<k$

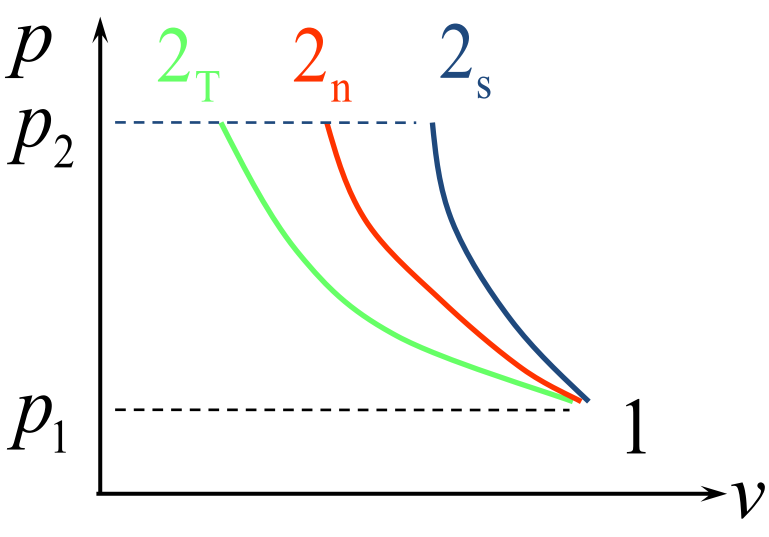


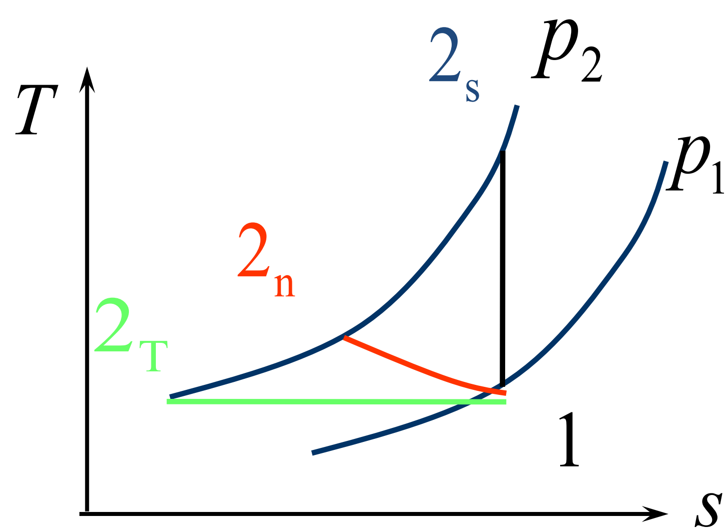


3、三种压气过程的参数关系

$$\left|w_{tT}\right| < \left|w_{tn}\right| < \left|w_{ts}\right| \qquad \left|q_{T}\right| < \left|q_{n}\right| < \left|q_{s}\right| = 0$$

$$v_{2T} < v_{2n} < v_{2s} \qquad T_1 = T_{2T} < T_{2n} < T_{2s}$$

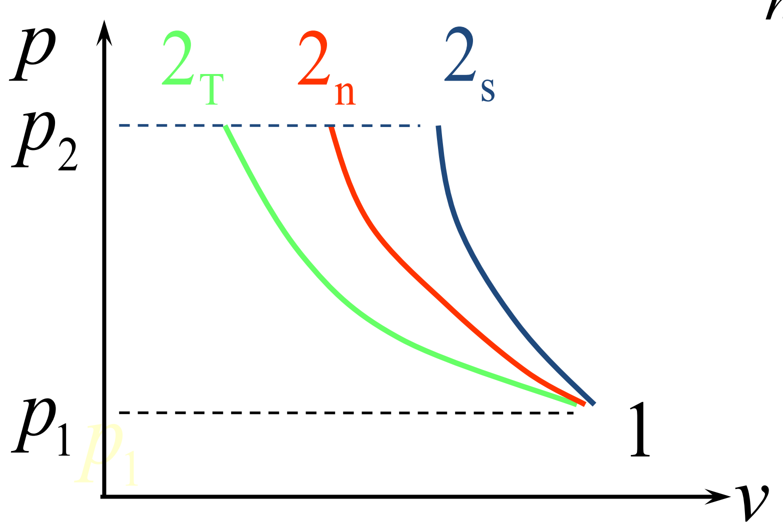


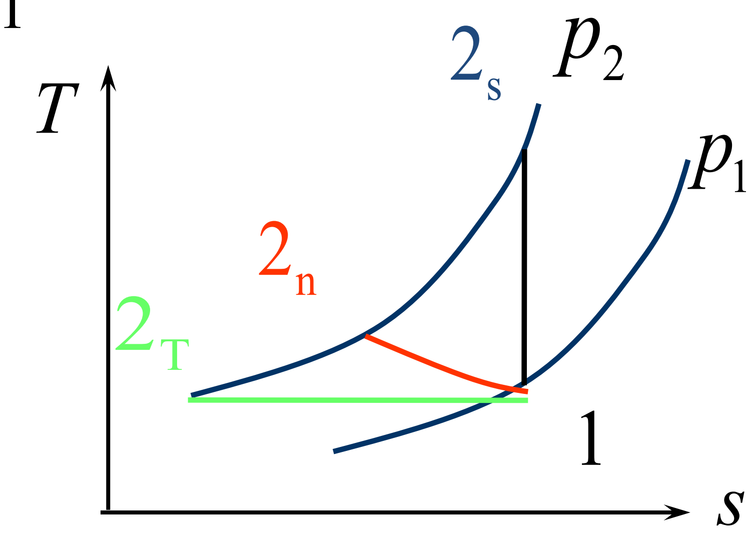


3、三种压气过程功的计算

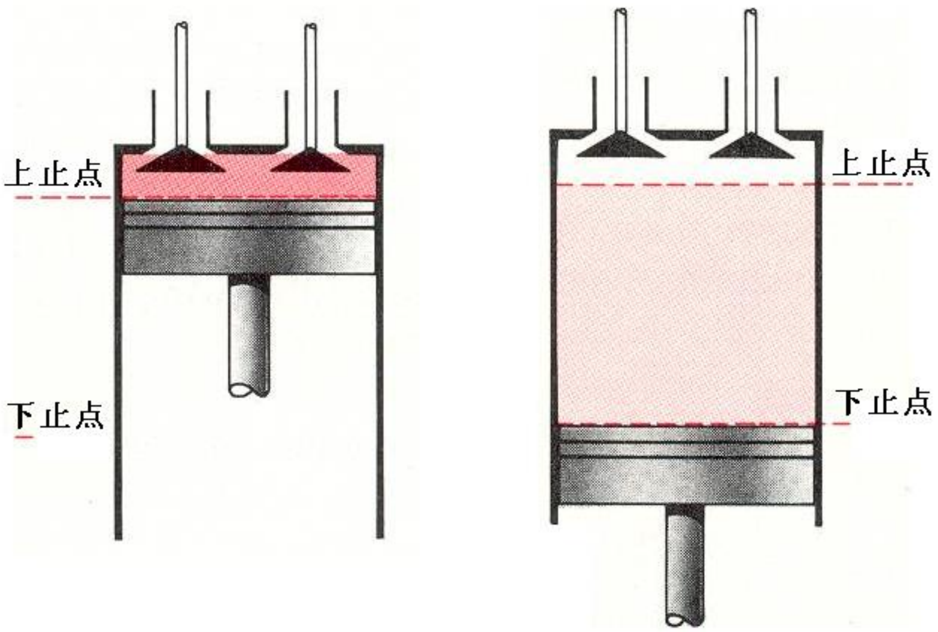
$$W_c = -\int_1^2 V\,\mathrm{d}p = W_t = W_s$$

- **定温压缩过程（$12_T p_2 p_1 1$）** $W_{s,T} = -p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = mRT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$ 需功最小
- **定熵压缩过程（$12_s p_2 p_1 1$）** $W_{s,s} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} mR(T_1 - T_2)$ 需功最大
- **多变压缩过程（$12_n p_2 p_1 1$）** $W_{s,n} = \frac{n}{n-1} mR(T_1 - T_2)$ 两者之间





4.3.2 余隙容积



实际上压气机的气缸是有余隙的

产生原因：
- 布置进、排气结构
- 制造公差
- 部件热膨胀

1、 活塞式压气机的余隙影响

避免活塞与进排气阀碰撞，留有余隙容积V_3

$1 \Rightarrow 2$ **压缩过程**$p1 \rightarrow p2$

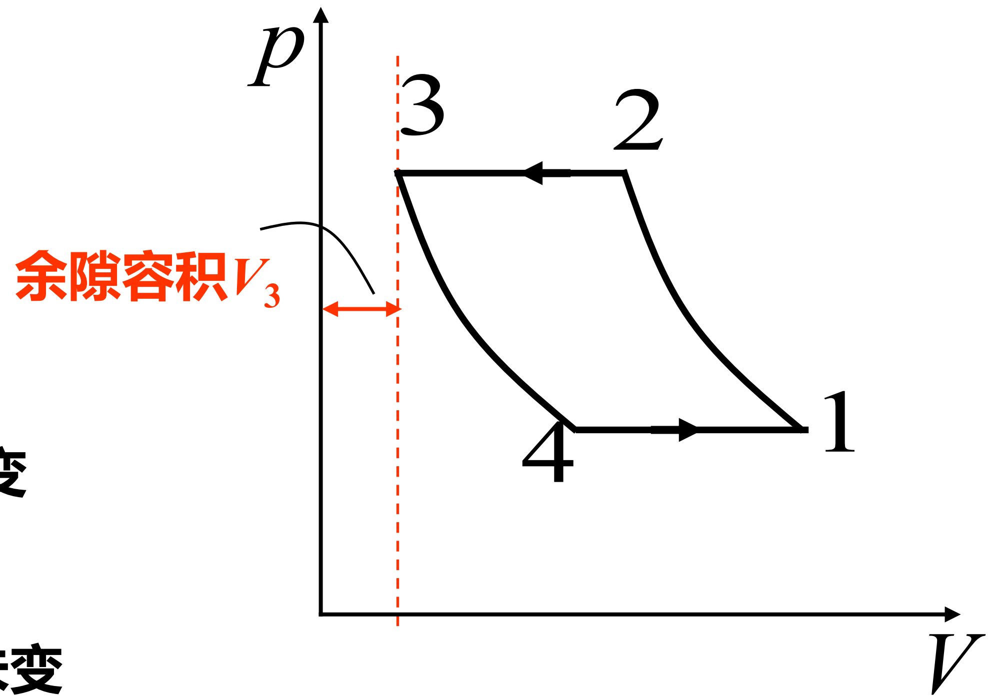
$2 \Rightarrow 3$ **排气，状态未变**

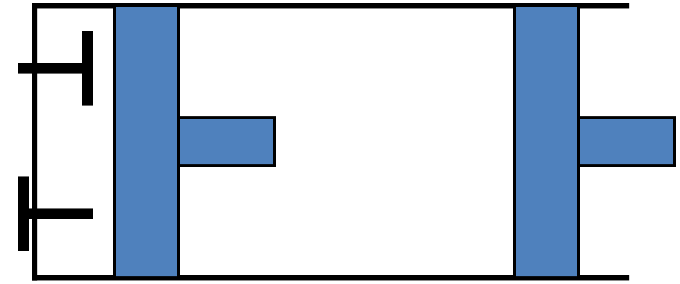
$3 \Rightarrow 4$ **残留气体膨胀**

$4 \Rightarrow 1$ **进新气，状态未变**

余隙容积比 $\sigma = \dfrac{V_3}{V_1 - V_3} \times 100\%$

σ一般大小为3%~8%





活塞排量 $V_h = V_1 - V_3$

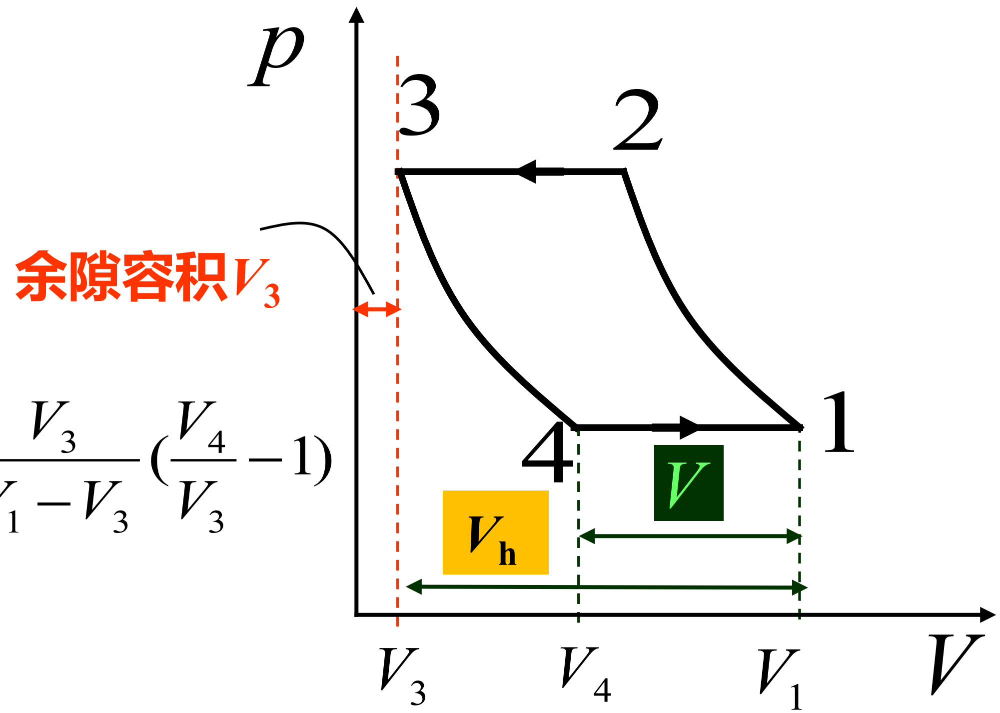
有效吸气量 $V = V_1 - V_4$

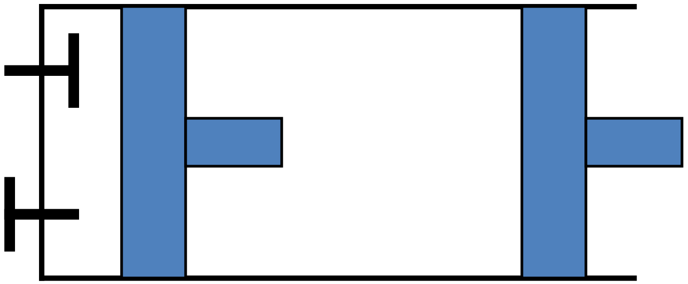
容积效率 $\eta_v = \dfrac{V}{V_h} = \dfrac{V_1 - V_4}{V_1 - V_3} = 1 - \dfrac{V_3}{V_1 - V_3}\left(\dfrac{V_4}{V_3} - 1\right)$

代入余隙容积比σ及 $\dfrac{V_4}{V_3} = \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$

$$\eta_v = 1 - \sigma\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right] = 1 - \sigma\left(\pi^{\frac{1}{n}} - 1\right)$$

其中 $\pi = \dfrac{p_2}{p_1}$，增压比





2、余隙容积V_3对理论压气功的影响

|功| = 面积12341 = 面积12561 - 面积43564

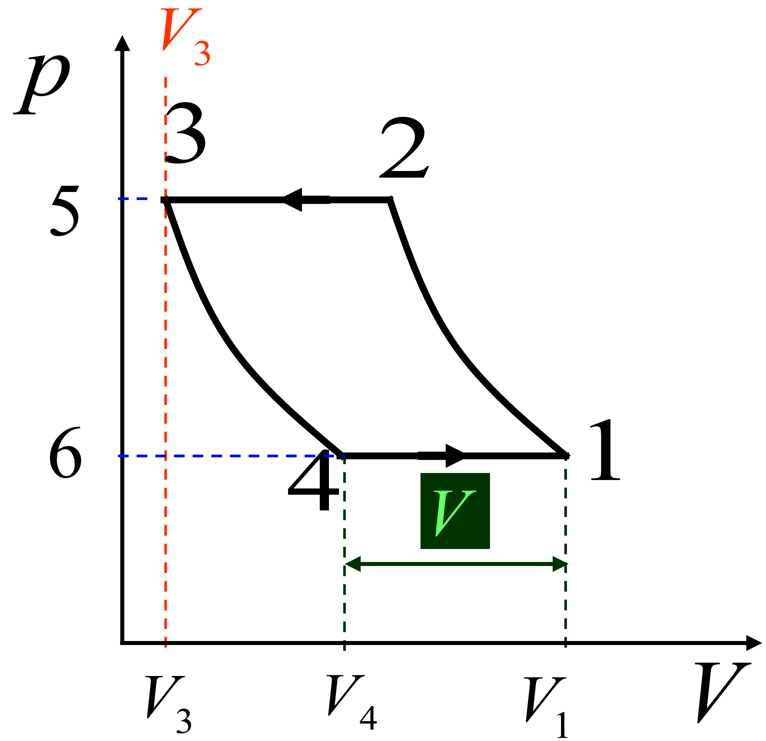
设1→2和3→4两过程*n*相同

$$W_{s,n} = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{n-1}{n}}]$$

$$- \frac{n}{n-1} p_4 V_4 [1 - (\frac{p_3}{p_4})^{\frac{n-1}{n}}]$$

由于 $p_1 = p_4$，$p_3 = p_2$，$V = V_1 - V_4$

$$W_{s,n} = \frac{n}{n-1} p_1 V [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{n-1}{n}}] = \frac{n}{n-1} mRT_1 [1 - (\frac{p_2}{p_1})^{\frac{n-1}{n}}]$$



上式表明余隙V_3对理论压气功无影响，但减少有效容积。设计时尽量减少余隙。

分析：

$$\eta_v = 1 - \sigma(\pi^{\frac{1}{n}} - 1)$$

容积效率η_v越大越好；余隙容积比σ越小越好。

要获得较高压力的气体，提高增压比π作用有限。

因为余隙存在，容积效率η_v下降，增压比π越大越不利。

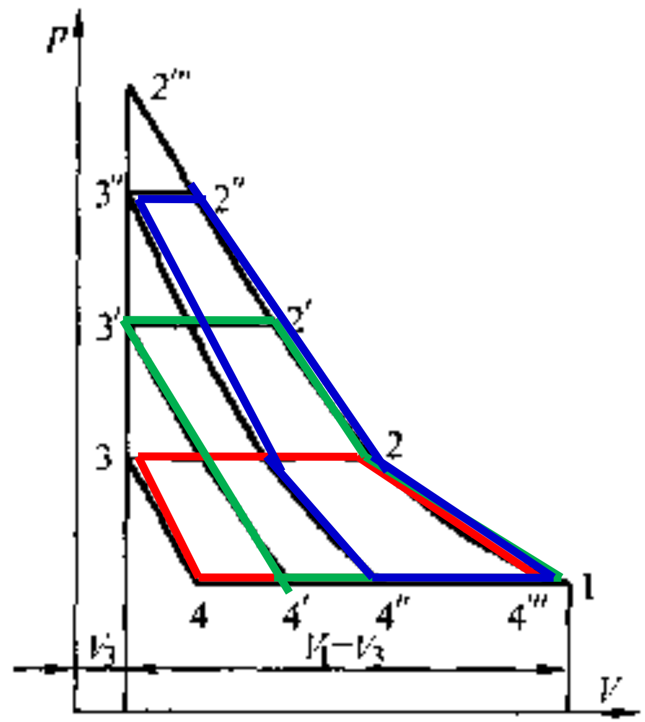


图 4·10 余隙容积对排气量的影响

必须采用多级压缩

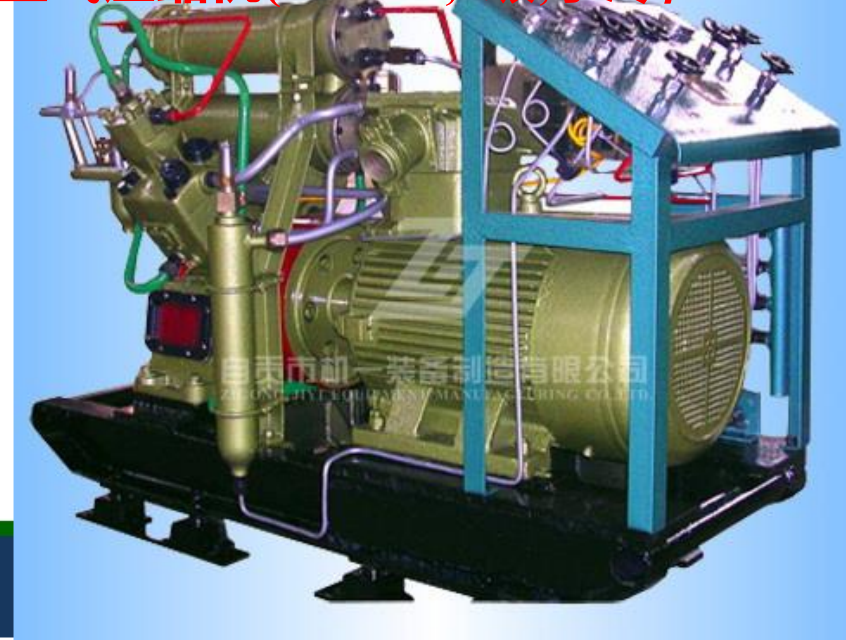
4.3.3 分级压缩及级间冷却

工程上需要高压气体，但压缩过程中随高 p 升高，T 升高（通常规定压气机排气温度不超过160~180℃）；T高，有效吸气量减小，即η_v下降。为使

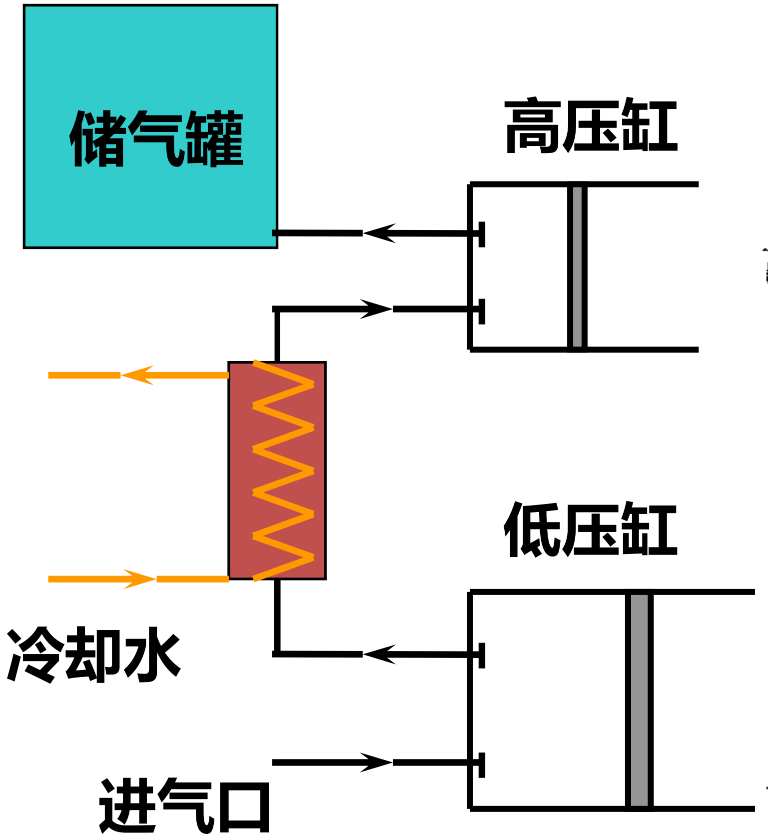
排气温度下降
容积效率增加 ⟶ **分级压缩**（**multistage compression**）
级间冷却（**intervening cooling**）

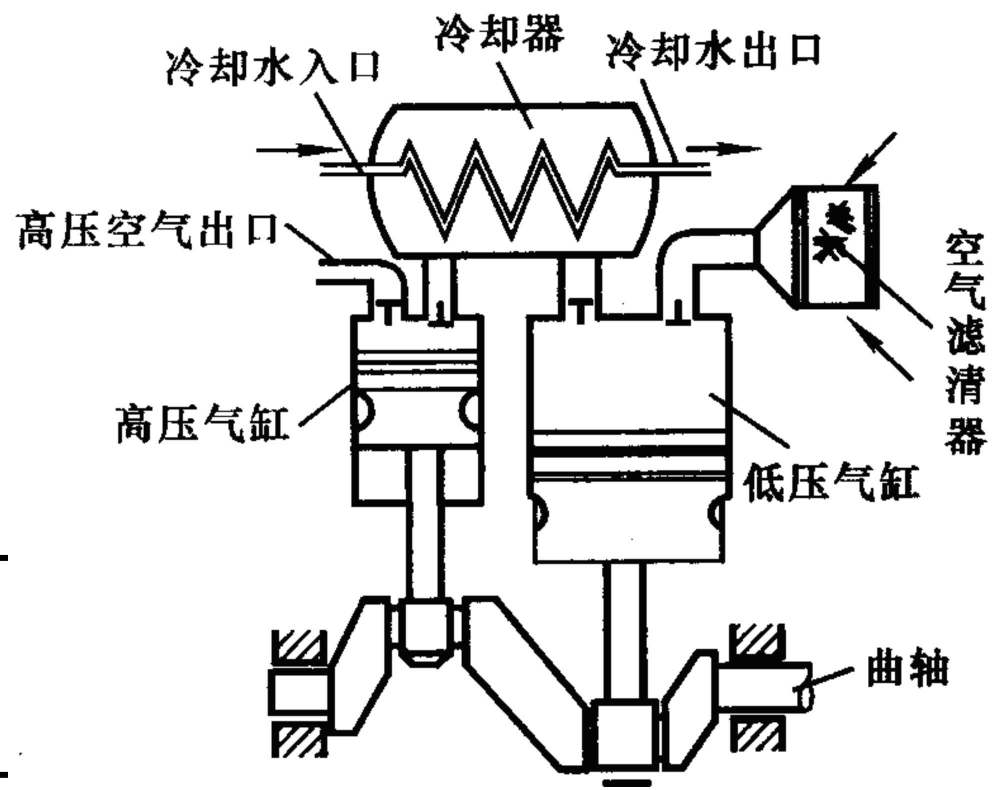
天然气压缩机(25MPa,4级,水冷,132kW)

空气压缩机(15MPa,4级,水冷，15kW)

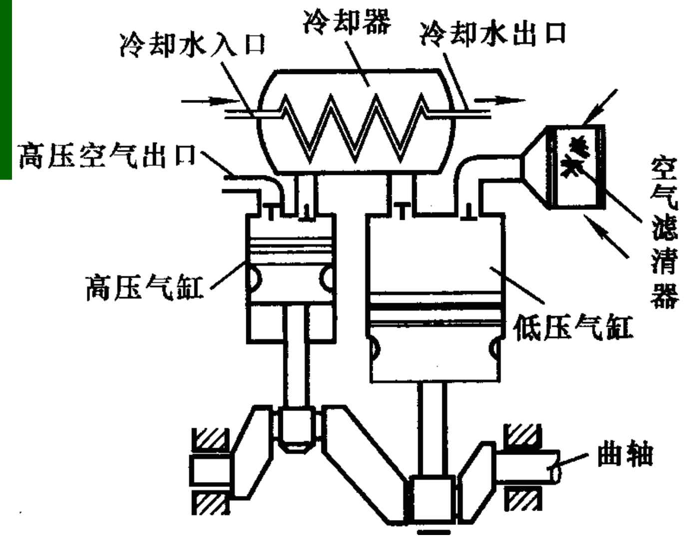


1、分级压缩中间冷却设备示意图





2、两级压缩中间冷却工作过程



$p_1 \Rightarrow 1$ 低压气缸吸气过程

$1 \Rightarrow 2$ 低压气缸中气体压缩过程

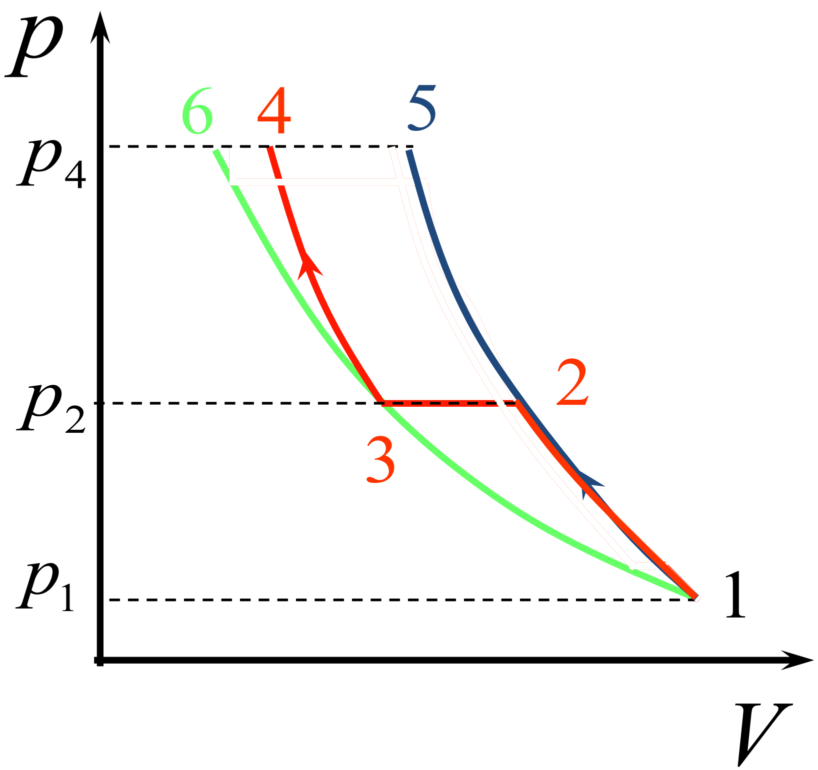
$2 \Rightarrow p_2$ 低压气缸向中冷器排气

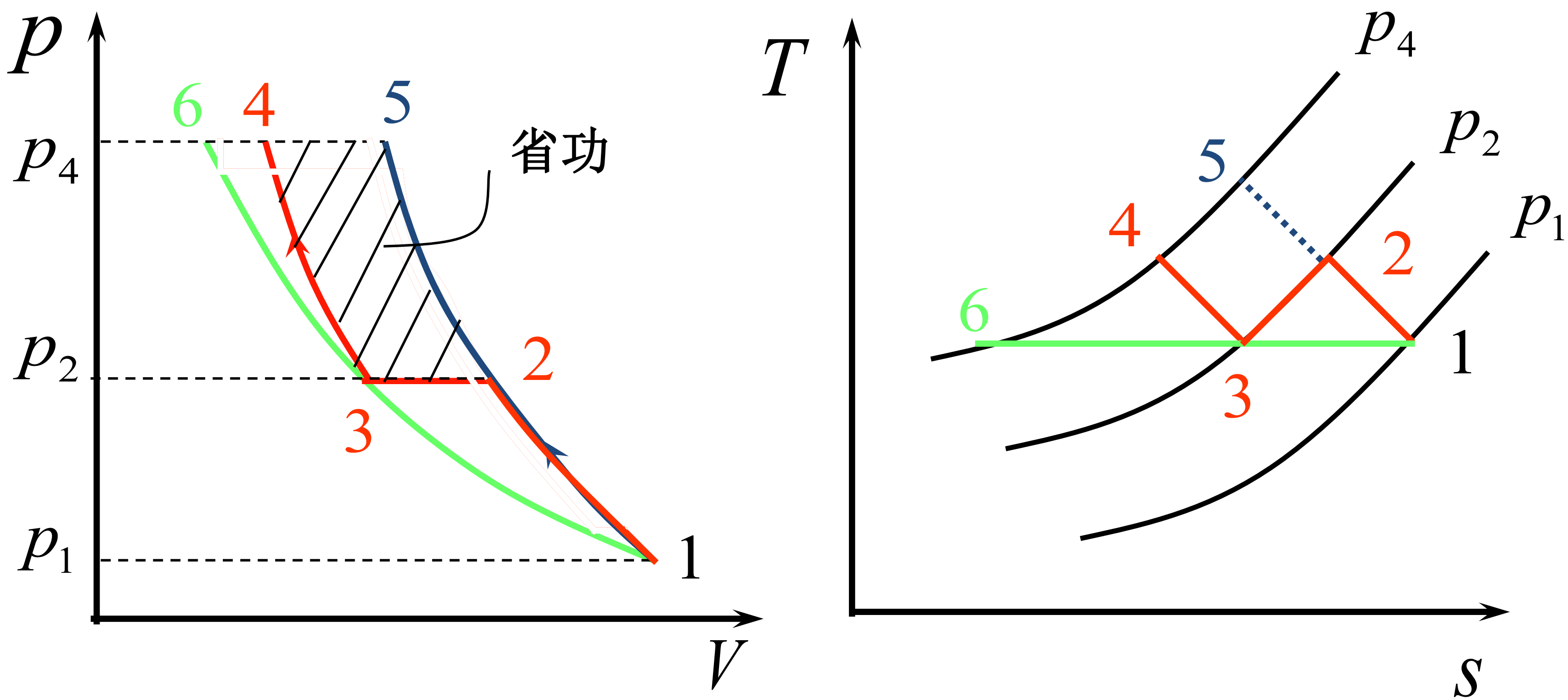
$2 \Rightarrow 3$ 气体在中冷器中定压冷却过程

$p_2 \Rightarrow 3$ 冷却后气体被吸入高压气缸

$3 \Rightarrow 4$ 高压气缸中气体的压缩过程

$4 \Rightarrow p_4$ 高压气缸排气过程





采用多级压缩的优点：1、排气温度下降（$T_4 < T_5$）；2、省功

有一个最佳压力比 $\frac{p_2}{p_1}$

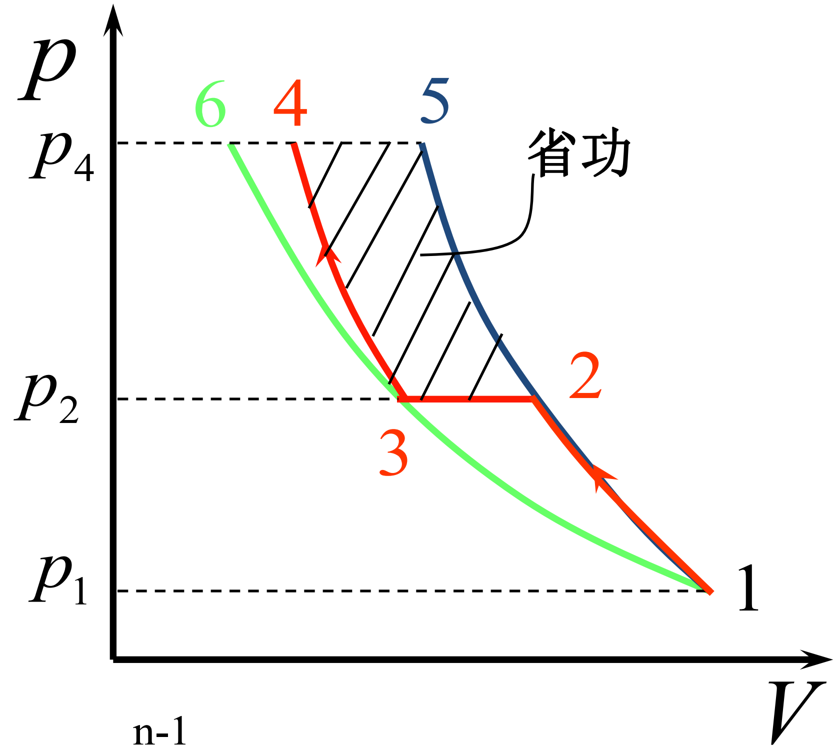
3、最佳压力比的推导

$$w_{分级} = w_{t(n)}^{I} + w_{t(n)}^{II}$$

$$= \frac{n}{n-1}RT_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$

假设 $\|$

$$+\frac{n}{n-1}RT_3\left[1-\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$



$$w_{分级} = \frac{n}{n-1}RT_1\left[2-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-\left(\frac{p_4}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$

$$w_{分级}=\frac{n}{n-1}RT_1[2-(\frac{p_2}{p_1})^{\frac{n-1}{n}}-(\frac{p_4}{p_2})^{\frac{n-1}{n}}]$$

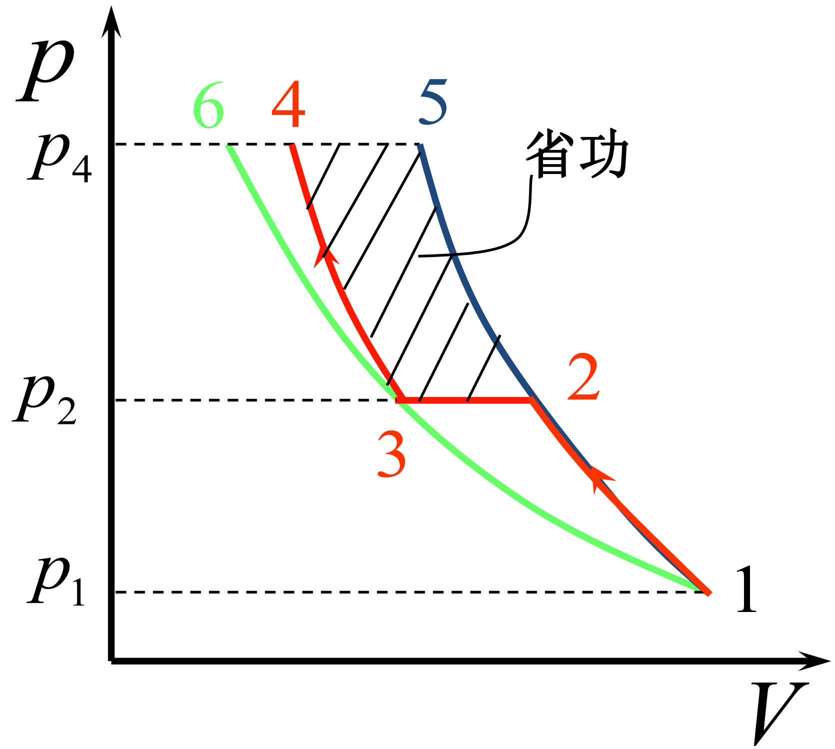
欲求$w_{分级}$最小值，

$$\frac{\partial w_{分级}}{\partial p_2}=0$$

$$p_2=\sqrt{p_1\cdot p_4}$$

即 $$\frac{p_2}{p_1}=\frac{p_4}{p_2}$$

说明当两级的升压比相等时，两级压缩所需的总轴功为最小。每级输入轴功也相同



最佳压力比 $$\pi=\frac{p_2}{p_1}=\frac{\sqrt{p_1\cdot p_4}}{p_1}$$

$$=\sqrt{\frac{p_4}{p_1}}=\sqrt{\frac{p_{终}}{p_{初}}}=(\frac{p_{终}}{p_{初}})^{\frac{1}{2}}$$

可证明若z级 $$\pi=(\frac{p_{终}}{p_{初}})^{\frac{1}{z}}$$

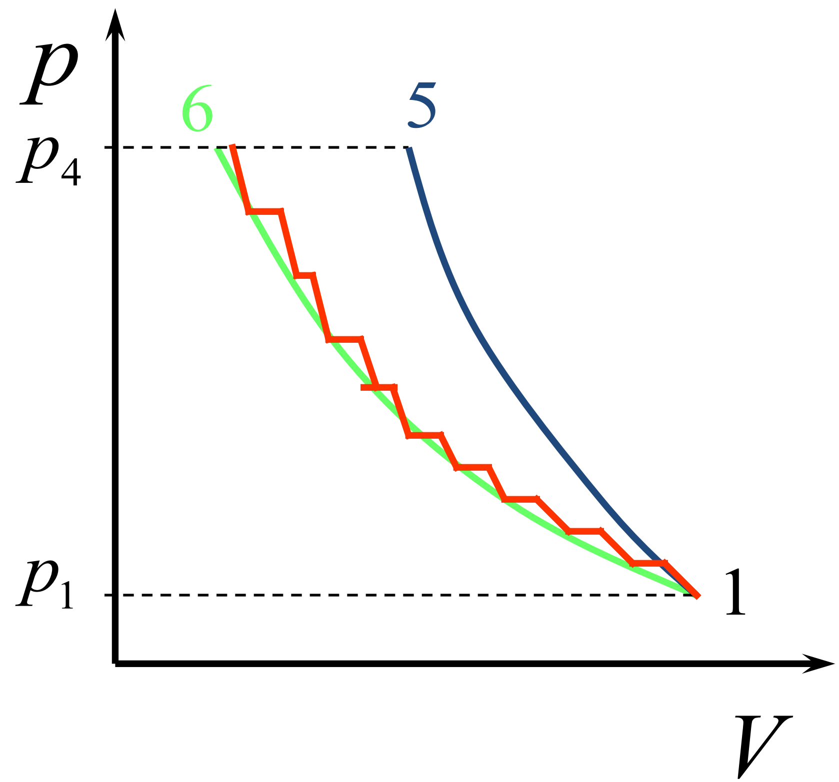
4、多级压缩讨论

分级
- 省功
- 降低出口温度

多级压缩达到无穷多级 ⟹ T

- (1)不可能实现
- (2)结构复杂(成本高)
- (3)可靠性下降

所以，一般采用 2 ~ 4 级压缩



1）按 $\pi = (\frac{p_{终}}{p_{初}})^{\frac{1}{z}}$ 选择各级中间压力，优点：

a. 各级耗功相等（证明略） $w_{s,i} = \frac{n}{n-1} R T_1 (\pi_i^{\frac{n-1}{n}} - 1)$

有利于曲轴平衡（总耗功 $w_s = z w_{s,i}$）

b. 各缸终温相同 $T = T_1 \pi_i^{\frac{n-1}{n}}$ 小于不如此分配时

各缸终温中最高者，有利于润滑油工作及使可靠性增加。

c. 各级散热相同 $q_i = \frac{n-\kappa}{n-1} c_v \Delta T$

各中冷器散热相等 $q_{中,\ i} = c_p \Delta T$

d. 各缸按比例缩小

e. 对提高整机容积效率 η_v 有利（在每级中升压比缩小，容积效率比不分级时大）

2）定温效率(isothermal efficiency):评价活塞式压气机性能指标——可逆定温过程与实际定温过程的压缩轴功之比：

$$\eta_{c,T} = \frac{w_{s,T}}{w_s'} < 1$$

3）绝热压缩效率:无冷却措施的实际压气机——可逆绝热过程与实际绝热过程的压缩轴功之比：

$$\eta_{c,T} = \frac{w_{s,s}}{w_{s,s}'} < 1$$

4）真空泵(vacuum pump)的实质也是压气机，是出口压力为恒值—环境压力，进气压力不断降低的压气机。