

# 第六章

## 蒸汽动力循环与制冷循环



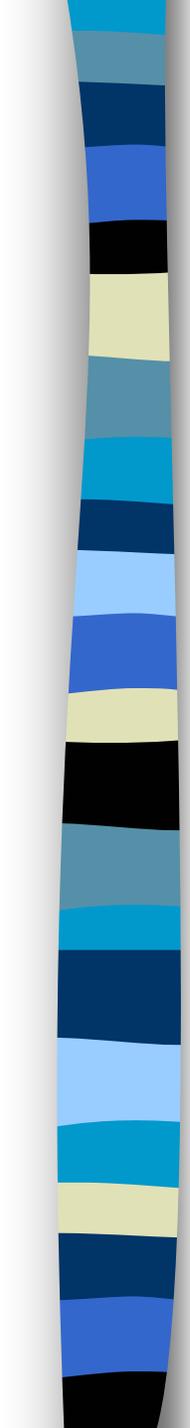
## 6 蒸汽动力循环与制冷循环

### 6.1 蒸汽动力循环

### 6.2 节流膨胀与作外功的绝热膨胀

### 6.3 制冷循环

### 6.4 深冷循环（气体液化循环）



# 本章目的与内容

- **目的：** 研究热、功转换过程的效果和影响因素，寻求能量转换的效率的方法。
- **内容：**
  - (1) 蒸汽动力循环及热力学分析
  - (2) 制冷循环及热力学分析
  - (3) 深冷和热泵的原理及热力学分析

# 本章要求及重点、难点

- (1) 熟练了解并掌握简单Rankine循环的T-S图及计算。
- (2) 了解Rankine循环的改进措施。
- (3) 了解节流膨胀和等熵膨胀的原理和应用。
- (4) 熟练了解并掌握单级蒸汽压缩制冷循环的T-S图及计算。
- (5) 了解吸收制冷循环和热泵的原理及应用。

**重点：**简单Rankine循环和单级蒸汽压缩制冷循环

**难点：**节流膨胀和等熵膨胀的原理

## 6.1 蒸汽动力循环

- 一. 蒸汽动力循环为正向卡诺循环
- 二. 蒸汽动力循环

### 1. 工作原理及T-S图

蒸汽动力循环的主要设备有：

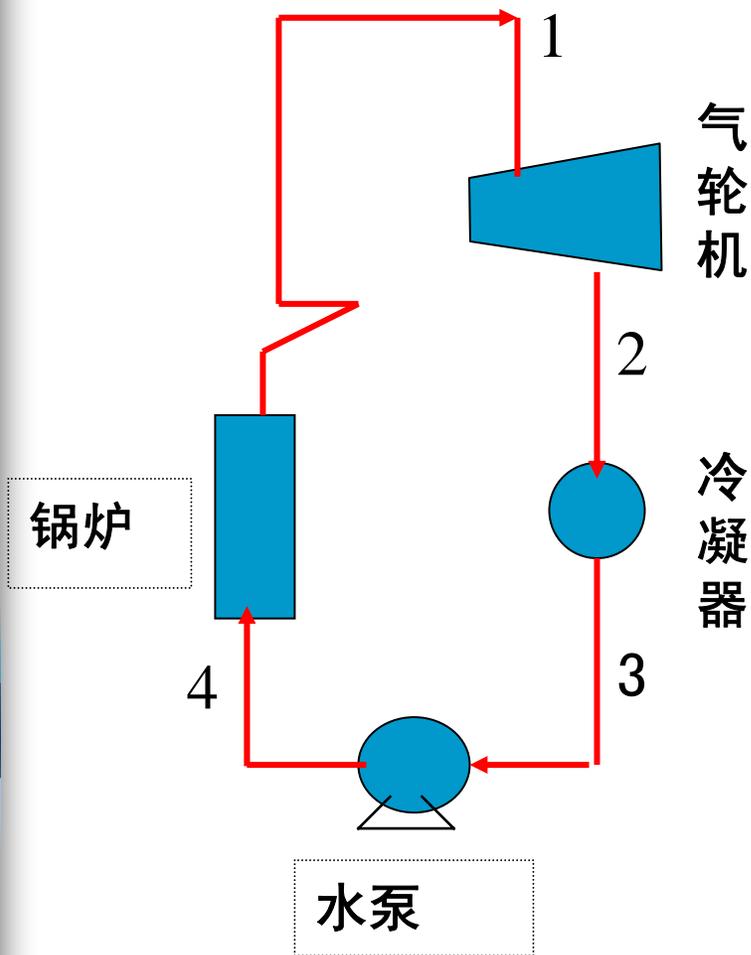
透平机（汽轮机）

冷凝器

水泵

锅炉、过热器等组成

工作介质一般为水



$P_1, T_1$  的高压高温蒸汽进入气轮机等熵膨胀到状态 2，同时对外做功，2 点状态为乏汽从汽轮机流出后进入冷凝器，乏汽在冷凝器中放出汽化潜热而变为该压力下的饱和水，放出的热量由冷却水带走，达到状态 3，饱和水经水泵升压到  $P_1$  进入锅炉，在锅炉吸收热量，使工质变化到状态 1，完成一个循环。

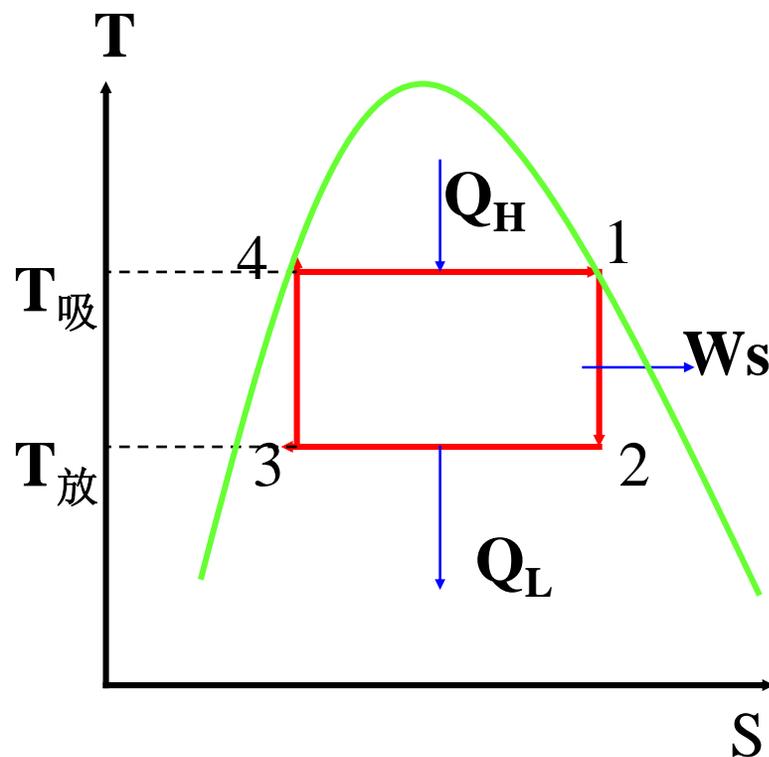
问题在于：

1) 湿蒸汽对汽轮机和水泵有浸蚀作用，汽轮机带水量不得超过10%，水泵不能带入蒸汽进泵；

2) 绝热可逆过程实际上难以实现。

第一个具有实际意义的蒸汽动力循环是朗肯循环。

T-S图



## 2. 朗肯 (Rankine) 循环

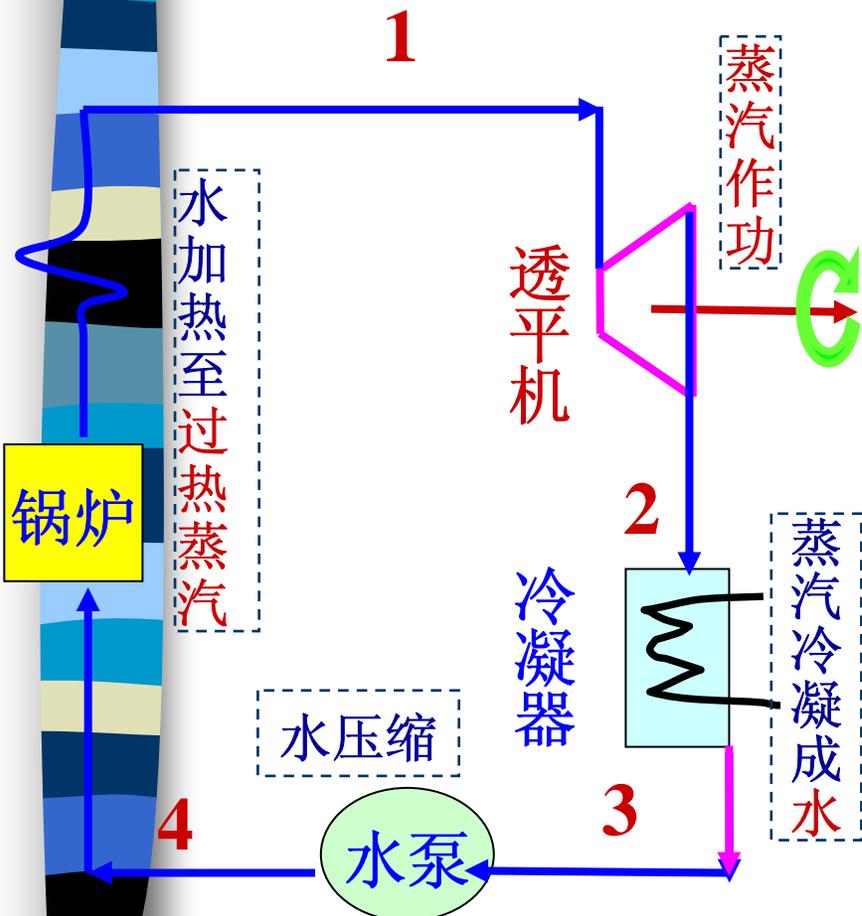
朗肯循环也是由四个步骤组成，与卡诺循环不同表现在

- (1) 工质进汽轮机状态不同
  - 卡诺循环：湿蒸汽
  - 朗肯循环：干蒸汽
- (2) 膨胀过程不同
  - 卡诺循环：等熵过程
  - 朗肯循环：不可逆绝热过程
- (3) 工质出冷凝器状态不同
  - 卡诺循环：气液共存
  - 朗肯循环：饱和水
- (4) 压缩过程不同
  - 卡诺循环：等熵过程
  - 朗肯循环：不可逆绝热过程，若忽略掉工作介质水的摩擦与散热，可简化为可逆过程。
- (5) 工作介质吸热过程不同
  - 卡诺循环：等温过程
  - 朗肯循环：不可逆吸热过程，沿着等压线变化

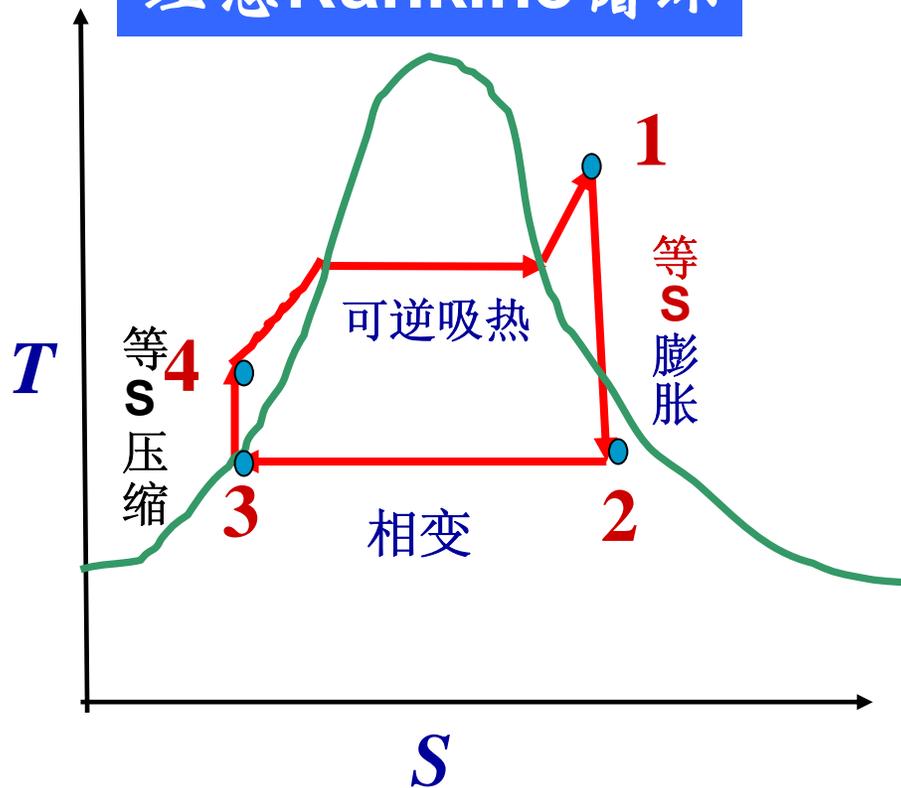
# 理想朗肯循环

蒸汽动力循环主要由水泵、锅炉、透平机和冷凝器组成。

## 原理



## 理想Rankine循环



# 理想 Rankine 循环

$$Q_1 = \Delta H_{4 \rightarrow 1} - W_S = H_1 - H_4$$

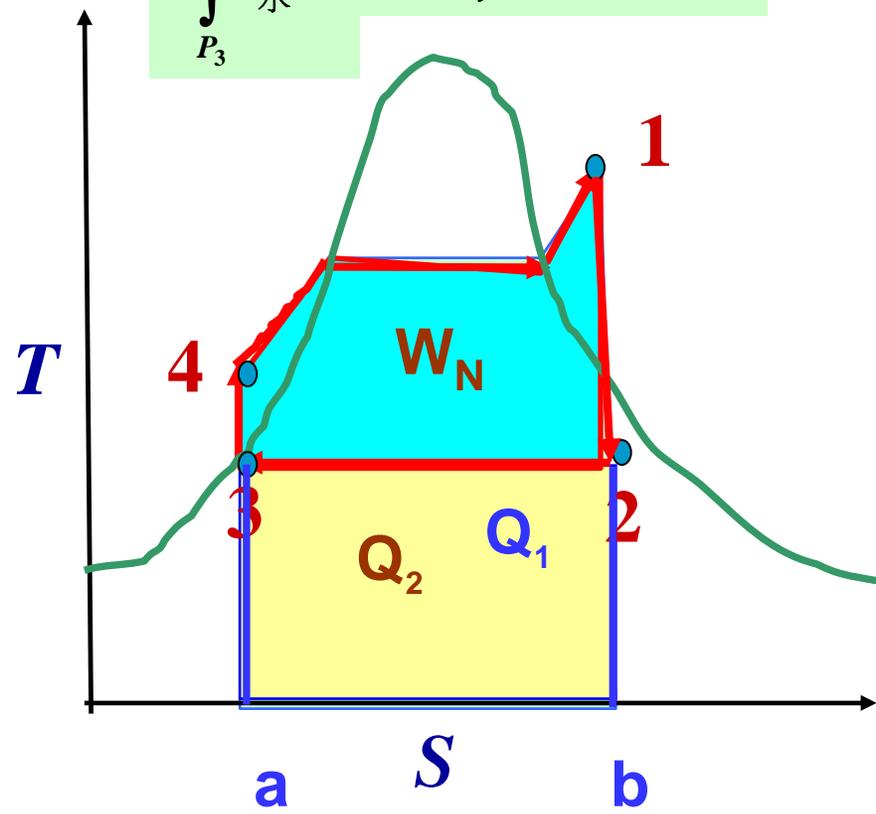
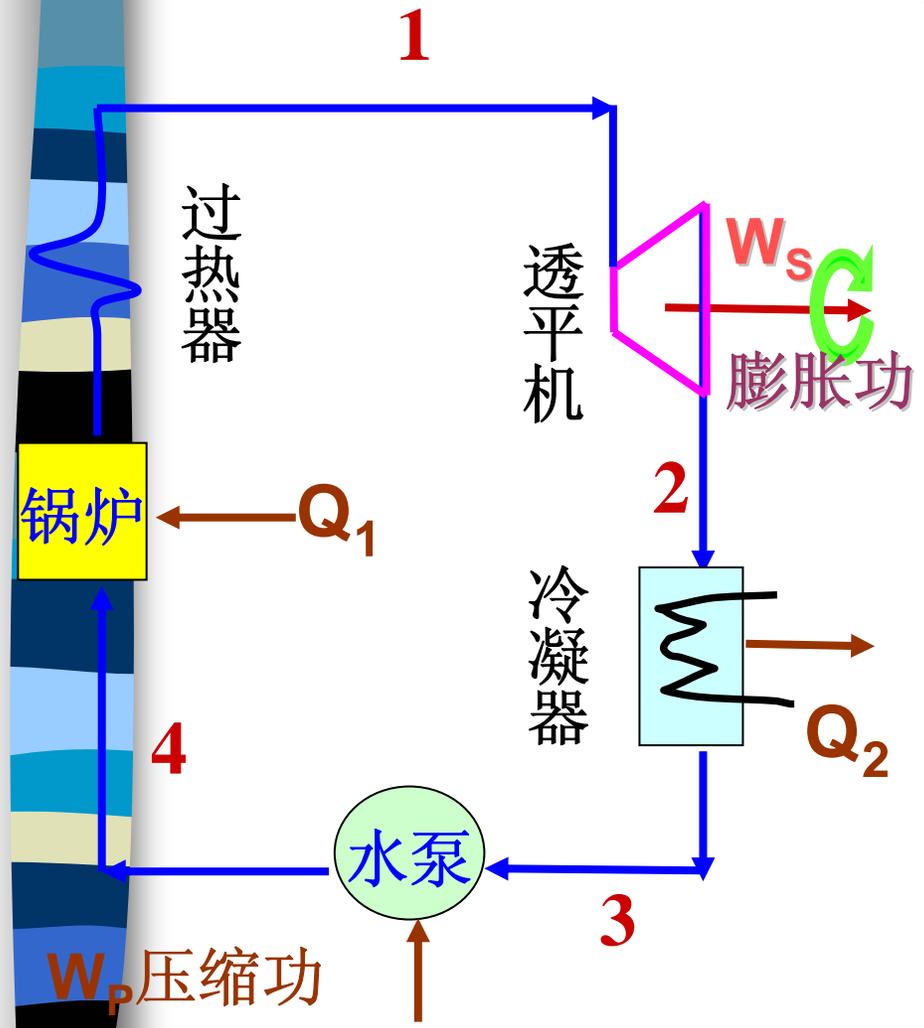
↓  
0

$$W_S = -Q + \Delta H_{1 \rightarrow 2} = H_2 - H_1$$

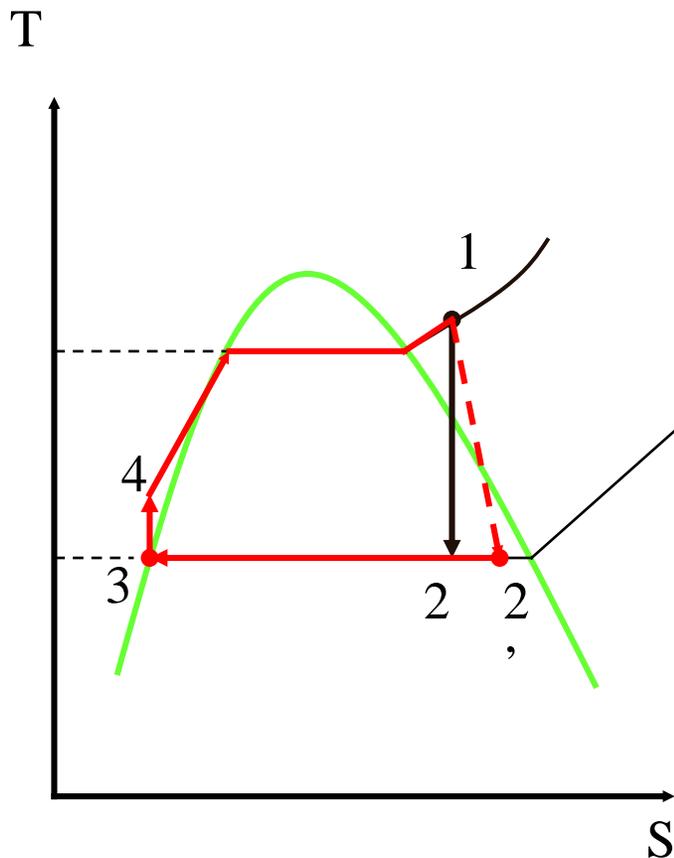
↓  
0

$$W_P = \Delta H_{3 \rightarrow 4} = H_4 - H_3$$

$$= \int_{P_3}^{P_4} V_{\text{水}} dP = V_{\text{水}} (P_4 - P_3)$$



水  $\xrightarrow{\text{定压升温}}$  沸点  $\xrightarrow{\text{定温定压汽化}}$  饱和蒸汽  $\xrightarrow{\text{定压升温}}$  过热蒸汽



1—2' 对应于汽轮机

2'—3 冷凝器进行，在冷凝器里冷却水把工作介质的热量带走使其由气体转变为液体。

3—4 水泵中进行加压

4—1 锅炉进行，水在锅炉中恒压加热。

### 3. 朗肯循环过程的热力学计算

(1) 工作介质在锅炉中吸热量

$$Q_H = \Delta H_{41} = H_1 - H_4 \quad \text{kJ/kg}$$

(2) 工作介质在冷凝器中排放的热量

$$Q_L = \Delta H_{2'3} = H_3 - H_{2'} \quad \text{kJ/kg}$$

$$Q_L = \Delta H_{23} = H_3 - H_2 \quad (\text{理想})$$

(3) 汽轮机工作介质的单位产功量

$$w_s = \Delta H_{12'} = H_{2'} - H_1 \quad \text{kJ/kg}$$

$$w_s = \Delta H_{12} = H_2 - H_1 \quad (\text{理想})$$

$$\therefore \eta_s = \frac{W_S}{W_{SR}} = \frac{H_1 - H_{2'}}{H_1 - H_2} \quad \therefore W_S = \eta_s W_{SR}$$

(4) 水泵中工作介质的单位  
耗功量  $w_p = \Delta H = H_4 - H_3$  kJ/kg

由于液态水的不可压缩性，水泵中工作介质耗功量可按下列  
式近似计算

$$w_p = \int v dp = v \Delta p = v(p_4 - p_3)$$

(5) 热效率

定义：锅炉中所提供的热量中转化为净功的量

数学式：

$$\eta = \frac{w_s + w_p}{Q_H} = \frac{(H_2 - H_1) + (H_4 - H_3)}{H_1 - H_4}$$

$$\therefore w_p \ll w_s$$

$$\therefore \eta = \frac{-w_s}{Q_H}$$

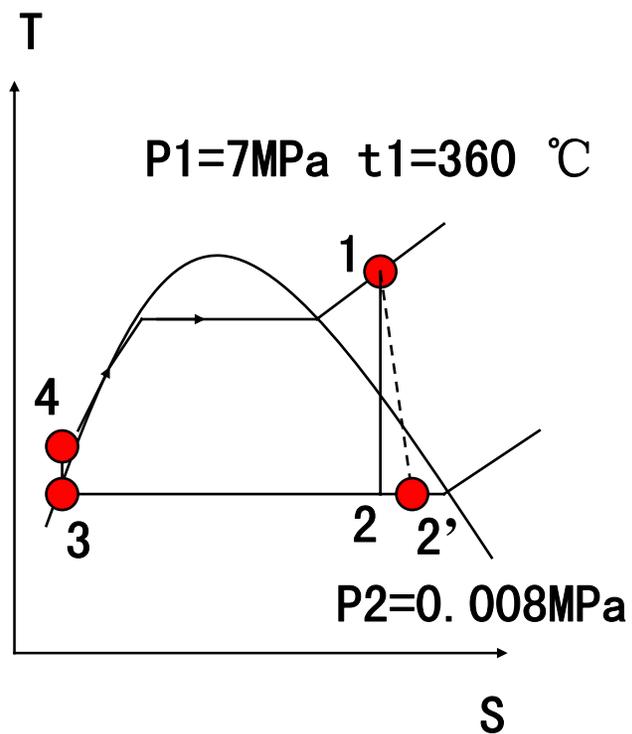
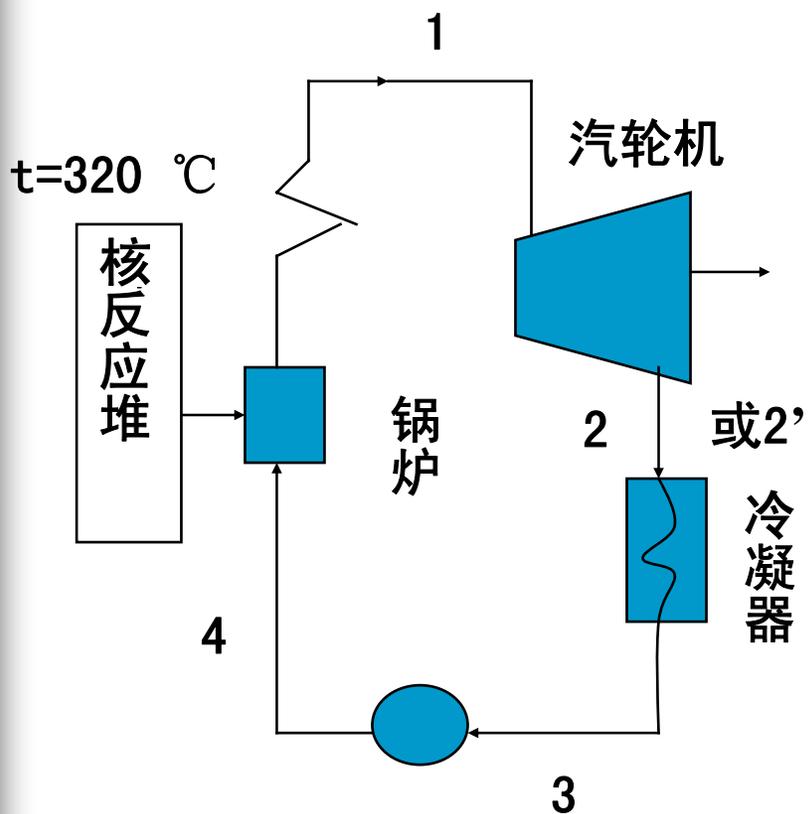
## 4. 应用举例

### ■ [P135-138 例6-1~6-2] 例6-1 自学

**例6-2** 某核动力循环如图所示，锅炉从温度为 $320^{\circ}\text{C}$  的核反应堆吸入热量 $Q_1$ 产生压力为 $7\text{MPa}$ 、温度为 $360^{\circ}\text{C}$  的过热蒸汽（点1），过热蒸汽经汽轮机膨胀做功后于 $0.008\text{MPa}$ 压力下排出（点2），乏气在冷凝器中向环境温度  $t_0=20^{\circ}\text{C}$  下进行定压放热变为饱和水（点3），然后经泵返回锅炉（点4）完成循环，已知汽轮机的额定功率为 $15\times 10^4\text{ kW}$ ，汽轮机作不可逆的绝热膨胀，其等熵效率为 $0.75$ ，而水泵可认为作可逆绝热压缩，试求：

- (1) 此动力循环中蒸汽的质量流量；
- (2) 汽轮机出口乏气的湿度；
- (3) 循环的热效率。

## 例6-2 插图



解:

1点 (过热蒸汽), 根据 $P_1=7\text{MPa}$ 、 $t_1=360\text{ }^\circ\text{C}$ ,查过热

水蒸气表得  $H_1=3045.5\text{kJ/kg}$ 、 $S_1=6.2801\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;

2点 (湿蒸汽),  $P_2=0.008\text{MPa}$ , 查饱和水蒸气表得

$$H_g=2577.0\text{kJ/kg} \quad H_l=173.88\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

$$S_g=8.2287\text{kJ}/\text{kg} \quad S_l=0.5926\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

汽轮机作等熵膨胀  $S_2=S_1=6.2801\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,

$$S_2=S_g x_2+(1-x_2)S_l$$

$$6.2801=8.2287x_2+(1-x_2) \times 0.5926$$

$$x_2=0.7448$$

$$H_2 = H_g x_2 + (1 - x_2) H_l$$

$$= 2577.0 \times 0.7488 + (1 - 0.7488) \times 173.88 = 1963.7$$

汽轮机作等熵膨胀过程1-2所作的理论功  $W_R$

$$W_R = H_2 - H_1 = 1963.7 - 3045.5 = -1081.8 \text{ kJ/kg}$$

汽轮机作实际膨胀过程1-2'所作的功  $W_s$

$$W_s = \eta_s W_R = -1081.8 \times 0.75 = -811.4 \text{ kJ/kg}$$

$$W_s = H_{2'} - H_1$$

$$H_{2'} = H_1 + W_s = 3045.5 + 811.4 = 2234.1 \text{ kJ/kg}$$

汽轮机作实际膨胀后乏气的干度为  $x_{2'}$

$$H_{2'} = H_g x_{2'} + (1 - x_{2'}) H_l$$

$$2234.1 = 2577.0 x_{2'} + (1 - x_{2'}) 173.9 \quad x_{2'} = 0.8573$$

乏气的湿度为  $1-0.8573=0.1427$

3点  $0.008\text{MPa}$ 饱和液体

$H_3=173.88\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$      $S_3=0.5926\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

4点  $P_4=7\text{MPa}$ ,  $S_4=S_3=0.5926\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

查未饱和水性性质表

	5MPa		7.5MPa		4MPa	
	H	S	H	S	H	S
40 °C	171.97	0.5705	174.18	0.5696	173.74	0.5698
80 °C	338.85	1.0720	340.84	1.0704	340.44	1.0707

$$\frac{0.5926 - 0.5698}{1.0707 - 0.5698} = \frac{H_4 - 173.74}{340.44 - 173.74}$$

$$H_4 = 181.33\text{kJ}/\text{kg}$$

■ 水泵所消耗的功

$$W_p = H_4 - H_3 = 181.33 - 173.88 = 7.45 \text{ kJ/kg}$$

• 热效率

$$\eta = \frac{-W}{Q_1} = \frac{-(-811.4 + 7.45)}{3045.5 - 181.33} = 0.2807$$

# 一. 提高朗肯循环热效率的措施

对卡诺循环:  $\eta_c = \frac{-w_s}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

对朗肯循环:  $\eta = \frac{-w_s}{Q_H} = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_4} \approx \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_3}$

要使  $\eta \uparrow$  :

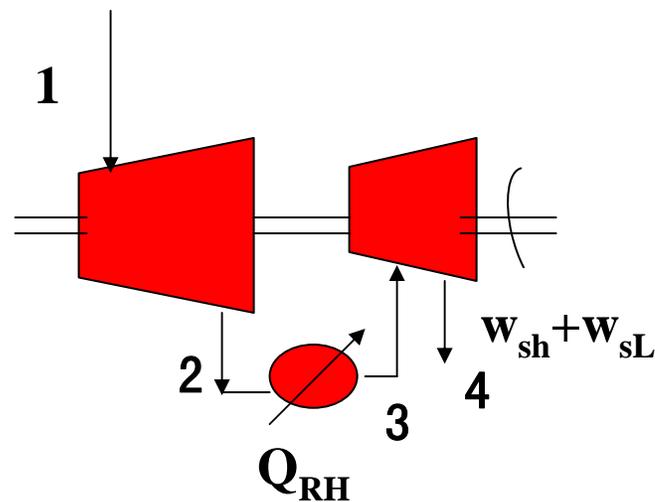
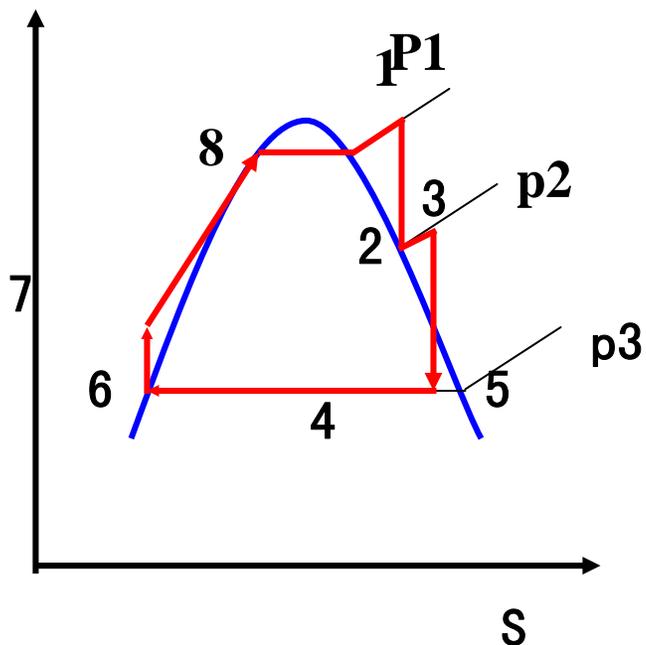
- (1)  $H_2 \downarrow$  , 降低压力 $P_2$  (汽轮机出口蒸汽压力)
- (2)  $H_1 \uparrow$  , 提高汽轮机进口蒸汽的压力或温度
- (3) 使吸热过程向卡诺循环靠近, 以提高热效率

# 1. 再热循环

再热循环的热效率

$$\eta = \frac{\sum W_s}{\sum Q} = \frac{W_{SH} + W_{SL} + W_p}{Q_H + Q_{RH}} \approx \frac{W_{SH} + W_{SL}}{Q_H + Q_{RH}}$$

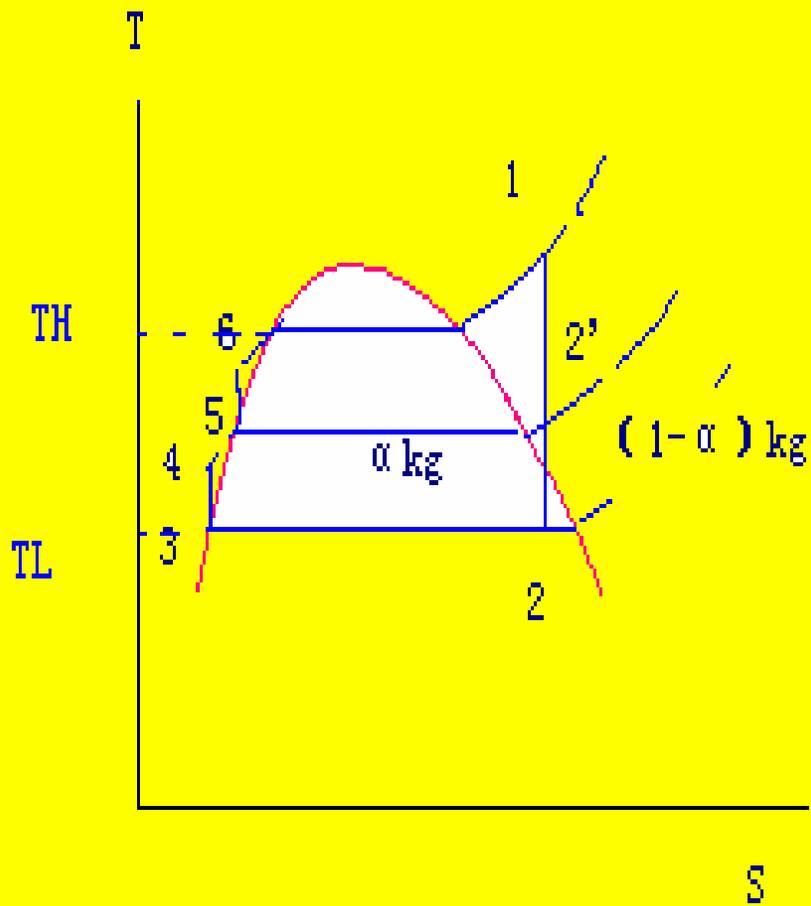
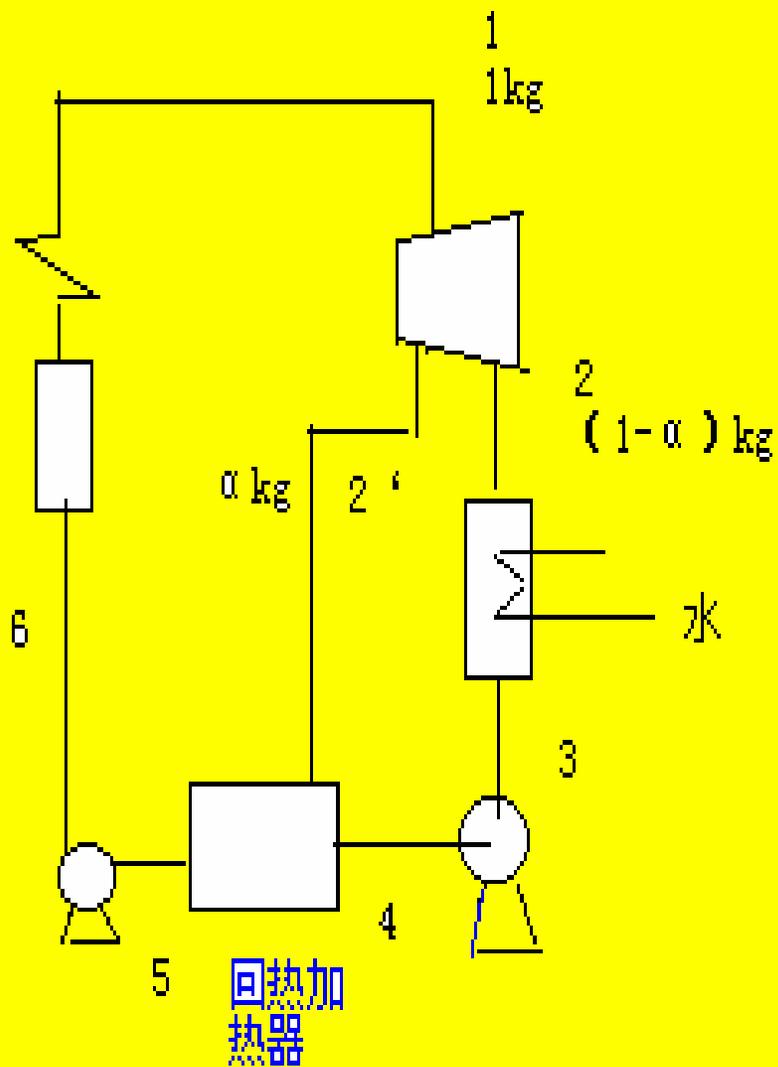
T



结论：(1)  $\eta$  提高

(2) 乏汽湿含量减少，干度增加。

## 2. 回热循环



回热循环的热效率:

$$\eta = \frac{w_s + w_p}{Q_H} \approx \frac{w_s}{Q_H} = \frac{Q_H + Q_L}{Q_H} = 1 + \frac{(1-\alpha)(H_3 - H_2)}{H_1 - H_6}$$

抽气量  $\alpha$  取回热器作能量衡算

$$\alpha(H_{2'} - H_5) = (1-\alpha)(H_5 - H_4)$$

$$\therefore \alpha = \frac{H_5 - H_4}{H_{2'} - H_4}$$

结论:

- (1) 减少了工作介质吸热过程的温差 (不可逆), 由  $T_H - T_4$  减少到  $T_H - T_6$
- (2) 热效率提高, 但设备成本提高。

### 3. 热电循环

- 分为**两种**：

- (1) **背压式汽轮机联合供电供热循环**

- 特点：

- ① 冷凝器中冷却工质的介质为热用户的介质（不一定是冷却水）冷凝温度由供热温度决定， $Q_L$ 得以利用；

- ② 排气压力受供热温度影响，较朗肯循环排气压力高，大于大气压力；

- ③ 热电循环效率 = 循环热效率 + 提供热用户的热量 / 输入的总热量。

$$\xi = \eta + \frac{|Q_L|}{Q_H}$$

## (2) 抽气式汽轮机联合供电供热循环

### ■ 特点:

- ① 工质部分供热，部分做功
- ② 供热量与乏汽无关
- ③ 热电循环效率

$$\xi = \eta + \frac{|Q_{RH}|}{Q_H}$$

$$Q_H = H_1 - H_7$$

$$Q_{RH} = \alpha(H_6 - H_2)$$

$$w_s = (H_1 - H_2) + (1 - \alpha)(H_2 - H_3)$$

$$\text{热效率 } \eta = \frac{w_s}{Q_H}$$

$$\text{能量利用参数 } \zeta = \frac{w_s + Q_h}{Q_H}$$



## 4. 应用举例

- [P140-143 例6-3~6-4] 例6-3自学

## 6.2 节流膨胀与作外功的绝热膨胀

### ■ 一. 节流膨胀过程

- 高压流体经过节流阀后迅速膨胀到低压的过程称为节流膨胀。

- 1. 特点：等焓过程

- 由热力学第一定律：
$$\Delta H + \frac{1}{2} \Delta u^2 + g\Delta Z = Q + W_s$$

$Q=0$ （来不及传热）， $W_s=0$ （不做功）

若忽略掉动能、位能的影响  $\therefore \Delta H=0$

对于  $H=f(T, P)$   $\therefore P$  发生变化  $\therefore T$  也随之发生变化

## 2. 微分节流效应（焦-汤效应）

### (1) 定义式

流体节流时，由于压力变化而引起的温度变化，称为微分节流效应

数学式：
$$\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \quad (6-12)$$

$\because H=f(T, P) \quad dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP$

节流过程： $dH = 0$

$$\therefore \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = - \frac{\left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T}{\left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P}$$


$$\therefore \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = c_p$$

$$dH = c_p dT + [V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P] dp$$

$$dT = 0 \text{ 时, } \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

$$\text{故 } \underline{\underline{\mu_J = \frac{1}{c_p} [T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V]}} \quad (6-13)$$

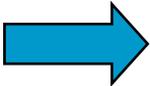
## (2) 节流膨胀致冷的可能性

① 对理想气体

$$\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = 0$$

$$\because PV=RT \quad V=RT/P$$

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P}$$


$$\mu_J = \frac{T \frac{R}{P} - \frac{RT}{P}}{c_p} = 0$$

这说明了理想气体在节流过程中温度不发生变化

## ② 真实气体

有三种可能的情况，由定义式知  $\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$

当  $\mu_J > 0$  时，表示节流后压力下降，温度也下降

$$T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V > 0 \quad \text{致冷}$$

当  $\mu_J = 0$  时，表示节流后压力下降，温度不变化

$$T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V = 0 \quad \text{不产生温度效应}$$

当  $\mu_J < 0$  时，表示节流后压力下降，温度上升，

$$T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V < 0 \quad \text{致热}$$

### (3) 结论

- ① 节流膨胀过程的主要特征是等焓过程；
- ② 理想气体节流时温度不变，不能用于制冷、制热；
- ③ 真实气体节流效应取决于气体的状态，在不同的状态下节流，具有不同的微分节流效应值。

### 3 转化点，转化曲线

转化点：当  $\mu_J = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H = 0$  时，T, P所对应的点。

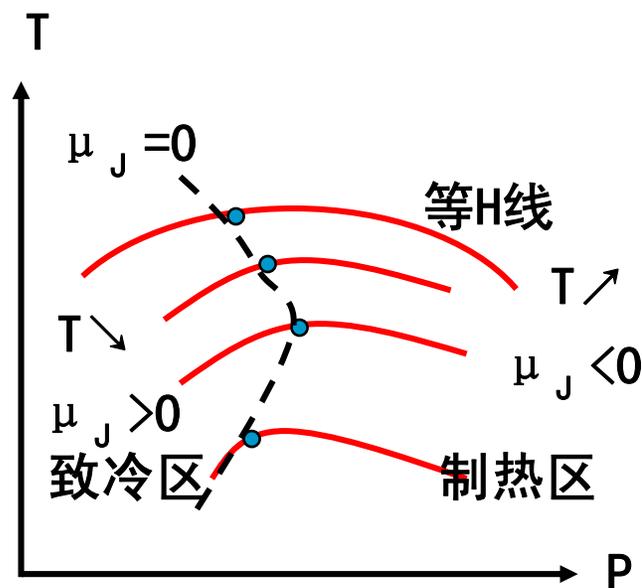
➤ 转化曲线：将各转化点联结起来所组成的曲线。

➤ 在转化曲线左侧，等焓线上，随P↓，T↓， $\mu_J > 0$ ，致冷区

➤ 在转化曲线右侧，等焓线上，随P↓，T↑， $\mu_J < 0$ ，制热区

➤ 转化线上， $\mu_J = 0$

图示：



## 4 积分节流效应

$$\Delta T_H = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{C_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right] dp \quad (6-14)$$

积分节流效应的求法：**三种**

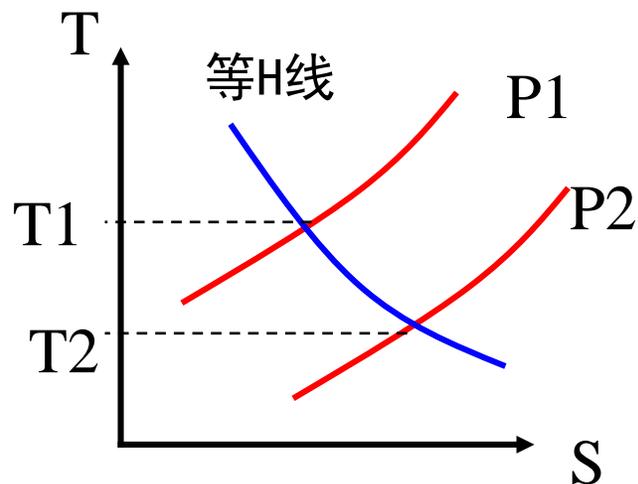
### (1) 公式法

若 $p$ 变化不太大， $\mu_J$ 为常数  $\Delta T_H = \mu_J(p_2 - p_1)$

若 $p$ 变化大， $\mu_J$ 不为常数，用式(6-14)计算，但很麻烦，一般不用。

## (2) T-S图法

$$\Delta T_H = T_2 - T_1$$



## (3) 利用经验公式估算

对于空气，当压力变化不太大时，不考虑温度的影响，可直接按下式近似估算：

$$\Delta T_H = 0.29(p_2 - p_1) \left( \frac{273}{T_1} \right)^2$$

式中：压力单位为大气压atm，温度单位为热力学温度开尔文。

对于不同的流体，其表达式不同。

## 二. 对外做功的绝热膨胀

### 1. 可逆绝热膨胀

特点：等熵过程

#### (1) 微分等熵温度效应

定义式：
$$\mu_s = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \quad (6-15)$$

#### (2) 等熵膨胀致冷的可能性

对于定组成单相体系，自由度为2， $S=f(T, P)$

对于等熵过程：

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dP = 0$$


$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = -\frac{\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T}{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p}$$

$$\therefore \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = \frac{C_p}{T}$$

$$\therefore \mu_S = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \frac{T\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p}{C_p}$$

$$\therefore T > 0 \quad C_p > 0$$

$\therefore \mu_S$  始终大于0

说明了任何气体在任何状态下经绝热膨胀，都可致冷。这与节流膨胀不同。

(Maxwell 第一关系式)

(6-16)

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p > 0$$

将 (6-16) 式与 (6-13) 式比较, 得

$$\mu_S = \mu_J + \frac{V}{C_p}$$

$\therefore$  任何气体均有  $V > 0$        $C_p > 0$

$\therefore \mu_S - \mu_J$  恒大于零.

这就说明了在相同条件下等熵膨胀系数大于节流膨胀系数, 因此由等熵膨胀可获得比节流膨胀更好的致冷效果.

### (3) 积分等熵温度效应

等熵膨胀时，压力变化为有限值所引起的温度变化，称之。

$$\Delta T_s = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \mu_s dp$$

计算积分等熵温度效应的方法有4种：

#### ① 利用积分等熵温度效应

$$\Delta T_s = \int_{p_1}^{p_2} \mu_s dp = \int_{p_1}^{p_2} \frac{T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p}{C_p} dp$$

#### ② 理想气体的积分等熵温度效应 $\Delta T_s$

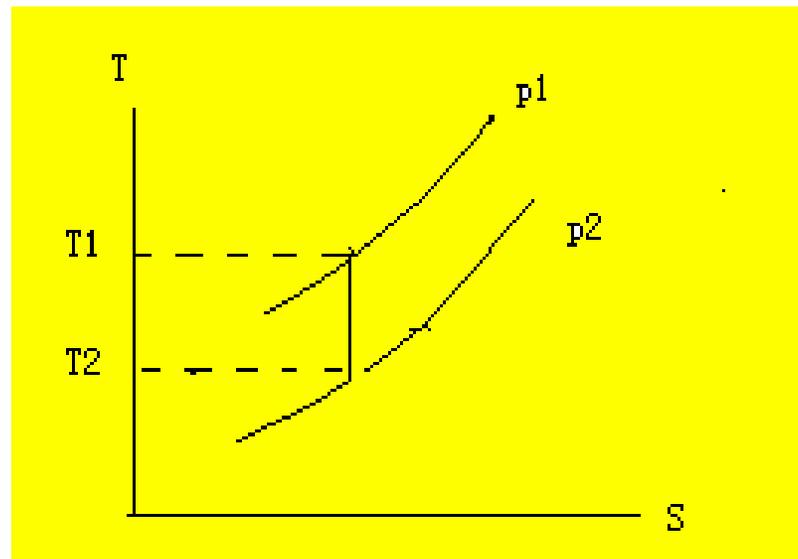
## 对于理想气体 绝热可逆过程

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\Delta T_s = T_2 - T_1 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - T_1 = T_1 \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

### ③ T-S图法

在有T-S图时，  
最方便的方法是由T-S图读取  $\Delta T_s$



#### ④ 用等焓节流效应计算

$$\mu_s = \mu_J + \frac{V}{C_p}$$

$$\Delta T_s = \int_{p_1}^{p_2} \mu_J dp + \int_{p_1}^{p_2} \frac{V}{C_p} dp$$

若  $C_p = \text{Const}$        $\Delta T_s = \Delta T_H + \frac{1}{C_p} \int_{p_1}^{p_2} V dp$

## 2. 不可逆对外做功的绝热膨胀

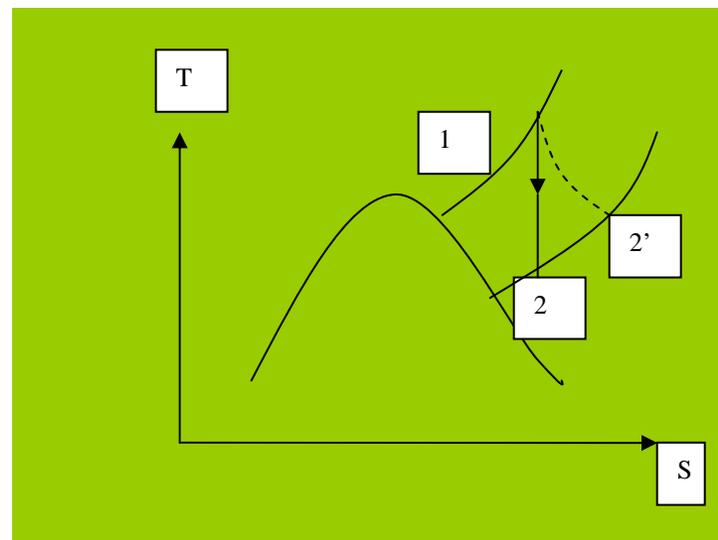
### ■ 对活塞式膨胀机

➤ 当  $t \leq 30^\circ\text{C}$        $\eta_s \approx 0.65$

➤ 当  $t > 30^\circ\text{C}$        $\eta_s \approx 0.7 \sim 0.47$

### ■ 对透平机      $\eta_s = 0.8 \sim 0.85$

- 不可逆对外做功的绝热膨胀的温度效应介于等熵膨胀效应和节流膨胀效应之间。



$$\left. \begin{aligned} \eta_s &= \frac{W_s}{W_{SR}} = \frac{\text{实际功}}{\text{理想功}} \\ \because \Delta H &= Q + W_s \\ \text{绝热 } Q &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \eta_s = \frac{H_1 - H_2'}{H_1 - H_2}$$

### 三. 等熵膨胀与节流膨胀的比较

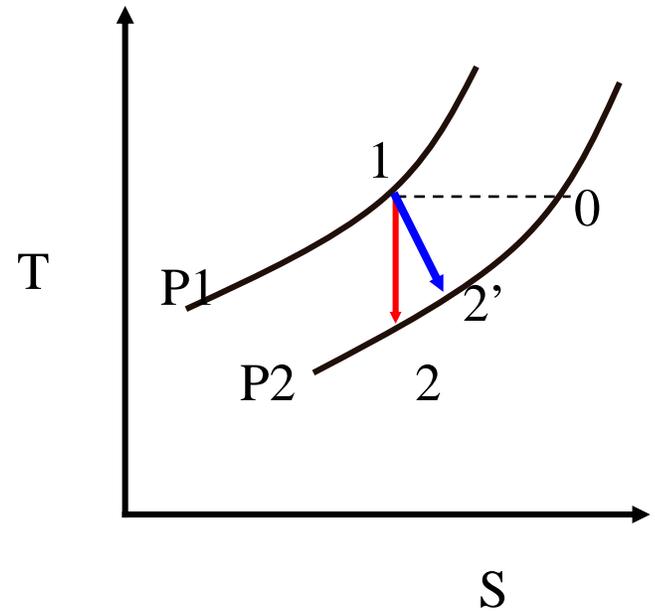
1. 等熵膨胀与气体的属性及状态无关，对任何气体任何状态都产生制冷效应。

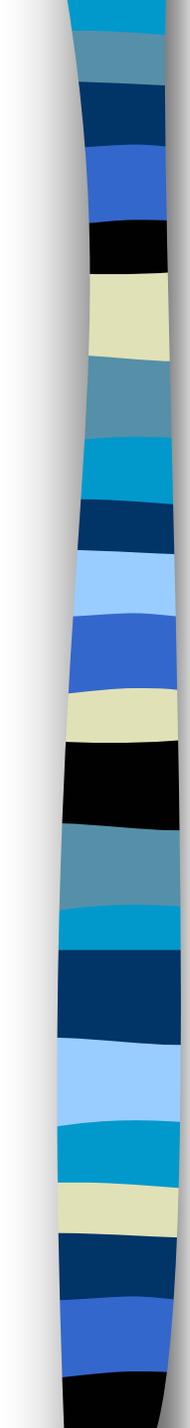
2.  $\underline{|\Delta T_S| > |\Delta T_H|}$   
 $|\Delta T_S| = |T_2 - T_1|$   
 $|\Delta T_H| = |T_2' - T_1|$

制冷量:  $Q_{OS} > Q_{OH}$

$$Q_{OS} = H_0 - H_2 = (H_0 - H_1) + (H_1 - H_2) = Q_{OH} + W_R$$

$$Q_{OH} = H_0 - H_2' = H_0 - H_1$$





### 3. 设备与操作

节流膨胀：简单，节流阀

等熵膨胀：复杂，膨胀机，需要低温  
润滑油。

### 4. 操作条件与运行情况

一般大、中型企业这两种都用，小型企业用节流膨胀

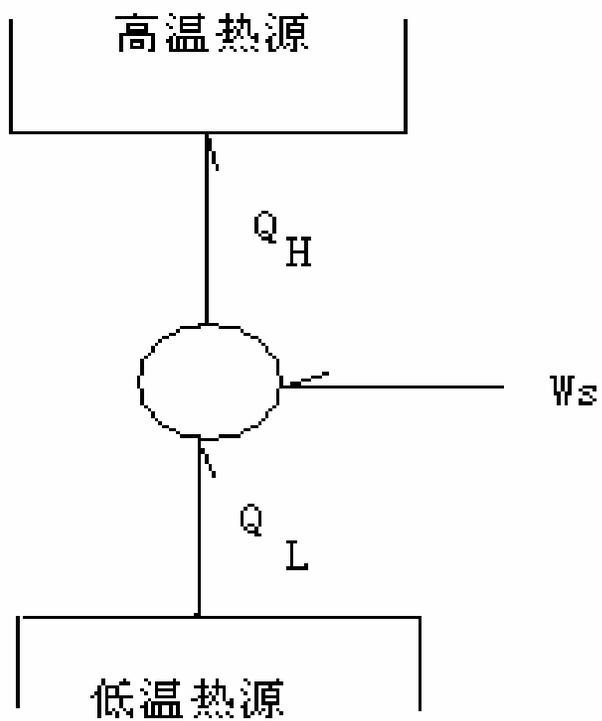
这两种膨胀过程是制冷的依据，也是气体液化的依据。

## 6.3 制冷循环

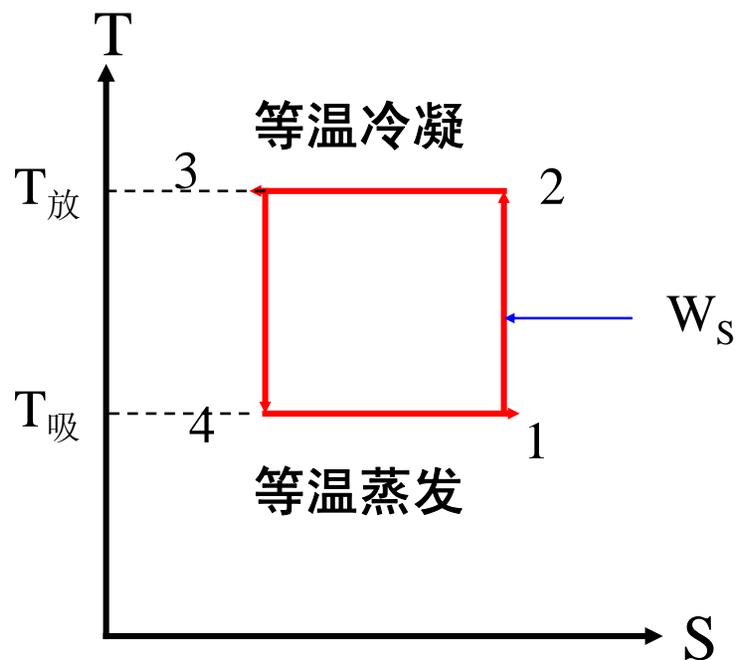
- 当冷冻温度大于173K，称普通冷冻。
- 小于173K称深度冷冻。

### 一. 制冷循环为逆向卡诺循环

- 正向卡诺循环：工质吸热温度大于工质放热温度。
- 逆向卡诺循环：工质吸热温度小于工质放热温度。



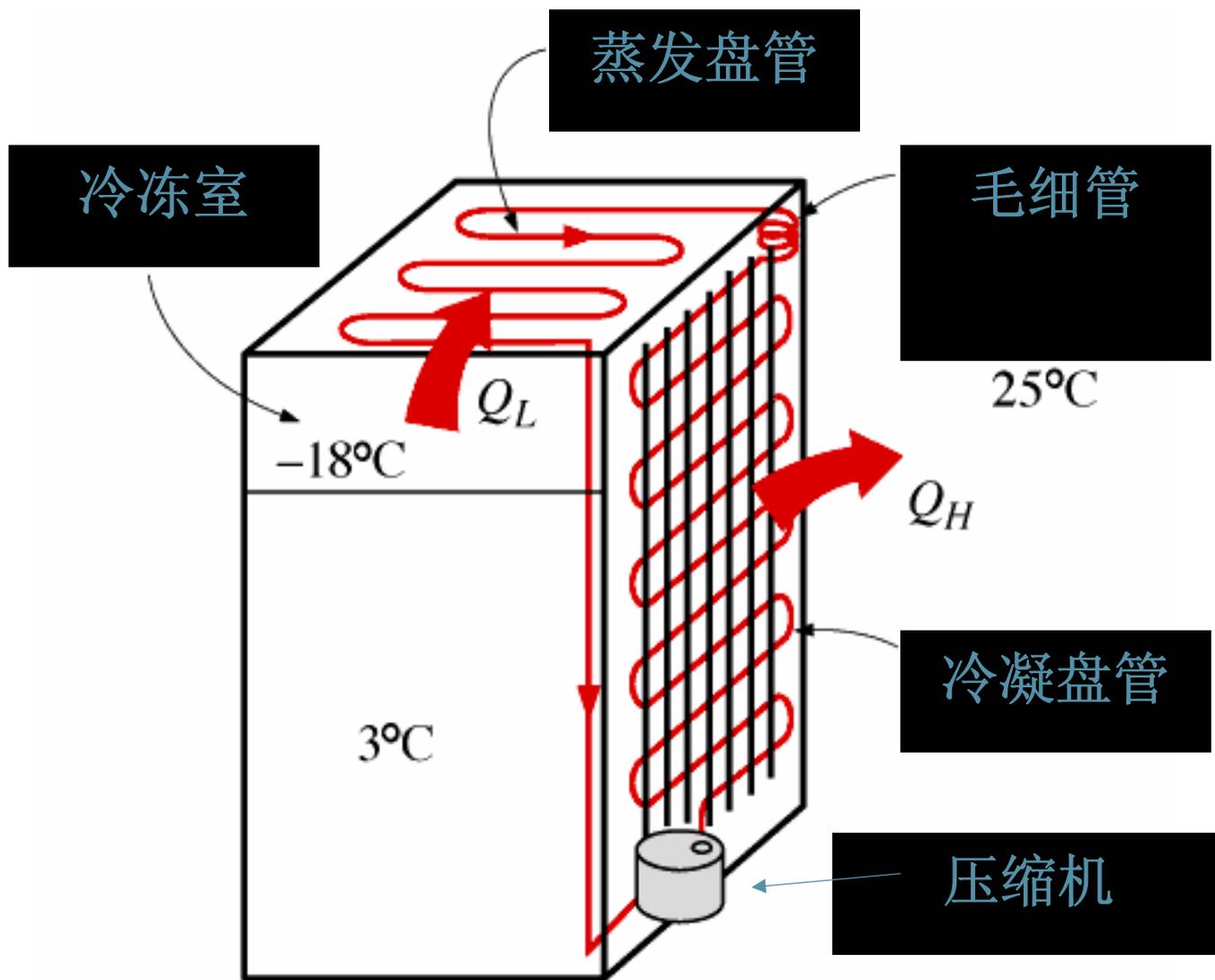
## 逆向卡诺循环



耗功过程：耗功量最小。

实际过程的耗功量要大于逆向卡诺循环的耗功量

## 二. 蒸汽压缩制冷循环

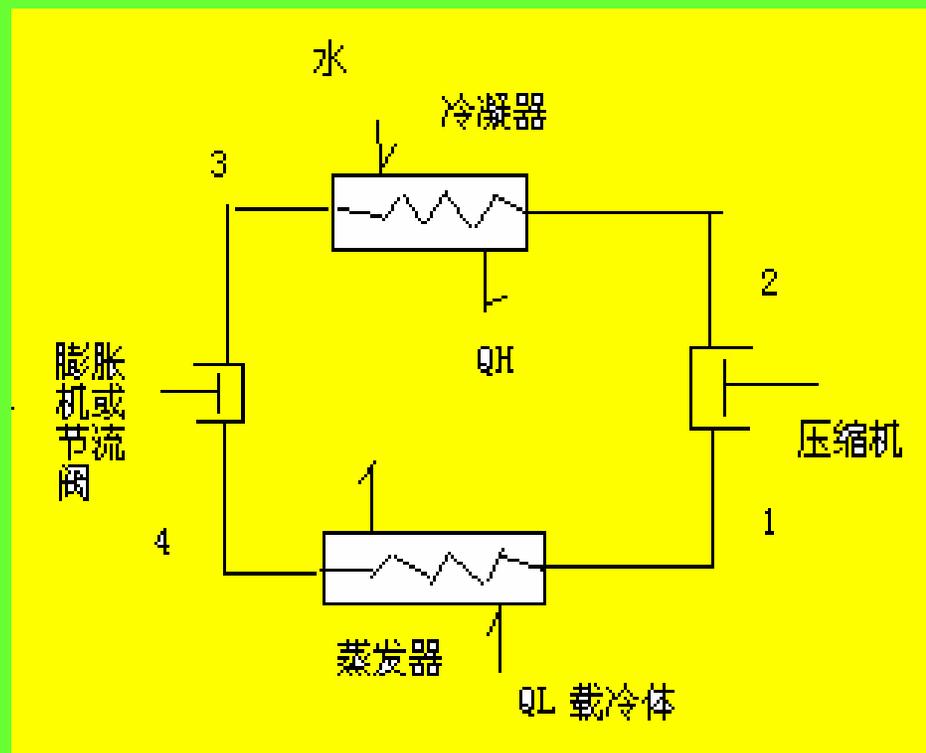


## ■ 1. 工作原理及T-S图

主要设备有：

- 压缩机
- 冷凝器
- 膨胀机（节流阀）
- 蒸发器

四部分组成。



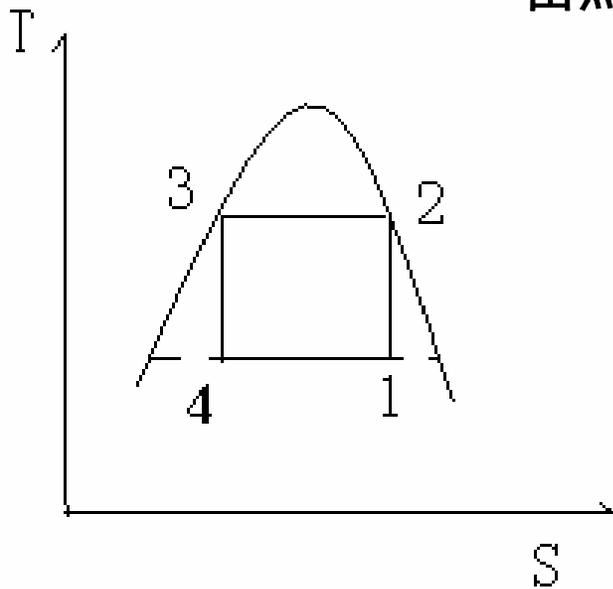
在制冷过程中，要涉及到相变、工质、压力、沸点等问题

## (1) 卡诺压缩制冷循环

特点:

传热过程可逆  
压缩、膨胀过程可逆

由热力学第一定律:  $\Delta H = Q + W_s$



$\Delta H = 0$  循环过程

$$\therefore Q = -W_s$$

$$Q = Q_{\text{放}} + Q_{\text{吸}}$$

$$Q_{\text{放}} = T_H (S_3 - S_2) = T_H (S_4 - S_1)$$

$$Q_{\text{吸}} = T_L (S_1 - S_4) = -T_L (S_4 - S_1)$$

故：

$$Q = (T_H - T_L)(S_4 - S_1)$$
$$-W_s = (T_H - T_L)(S_4 - S_1)$$

衡量制冷效果好坏的一个技术指标是制冷系数。

定义：消耗单位功所获得的冷量。

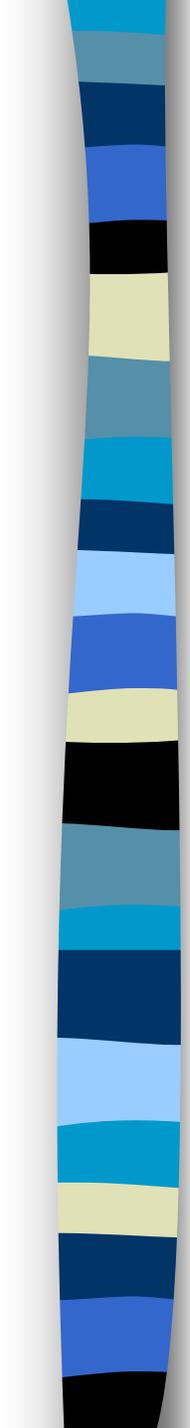
$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{吸}}}{W_s}$$

卡诺压缩制冷循环制冷系数

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{吸}}}{W_s} = \frac{T_L(S_1 - S_4)}{(T_H - T_L)(S_1 - S_4)} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

## 结论：

- 制冷系数与冷却温度 $T_H$ 和载冷体（被冷物质） $T_L$ 有关。
- 若制冷温度 $T_L$ （由工艺条件决定）一定， $T_H \searrow$ ， $\varepsilon \nearrow$
- 若冷却水（空气） $T_H$ 一定， $T_L \nearrow$ ， $\varepsilon \nearrow$ ，因此要以满足工艺条件为依据。如果工艺条件为 $-20^\circ\text{C}$ ，一般选取 $T_L = -25^\circ\text{C}$ 即可。过冷 $5^\circ\text{C}$ ，不能太多。



## (2) 实际压缩制冷循环

- 实际压缩制冷循环就其循环所需的设备来说，完全与卡诺压缩制冷循环所需要的设备相同，
- 关键在于在循环的过程中，每一步都不一定是可逆的。
- 它与卡诺压缩制冷循环不同处表现在五个方面。

① 制冷剂（工质）进压缩机状态不同

卡诺：湿气

实际：干气

② 压缩过程不同

卡诺：等熵过程

实际：不可逆绝热过程

等熵效率： $\eta_s = \text{等熵过程耗功} / \text{实际过程耗功}$

$$\eta_s \leq 1$$

$$\therefore \Delta H = Q + W_s$$

若  $Q=0$  则  $W_s, R = \Delta H_R$

$$\therefore \eta_s = \frac{\Delta H_R}{\Delta H}$$

③ 冷凝过程不同

卡诺：等温过程

实际：不可逆过程，沿着等压线变化。

④ 制冷剂出冷凝器状态不同

卡诺：饱和液体

实际：过冷液体

⑤ 膨胀过程不同

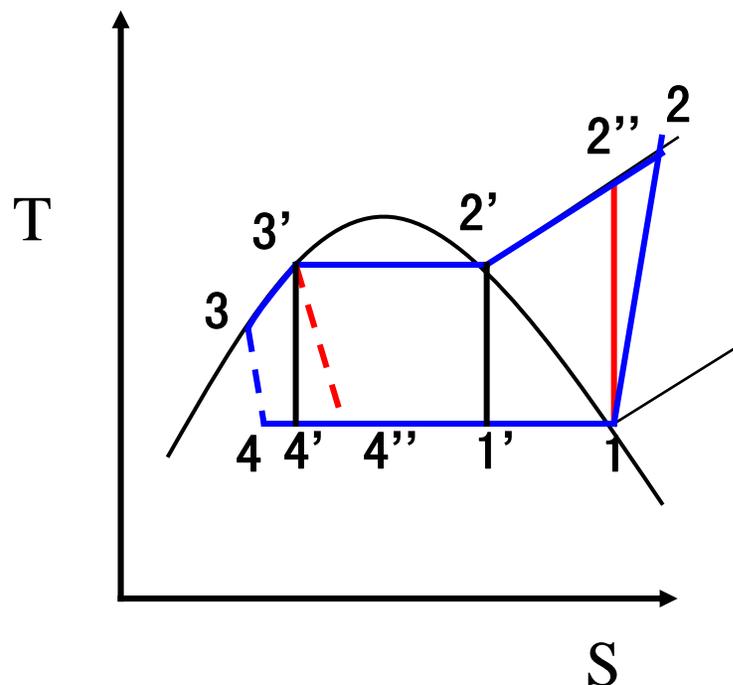
卡诺：等熵（膨胀机）

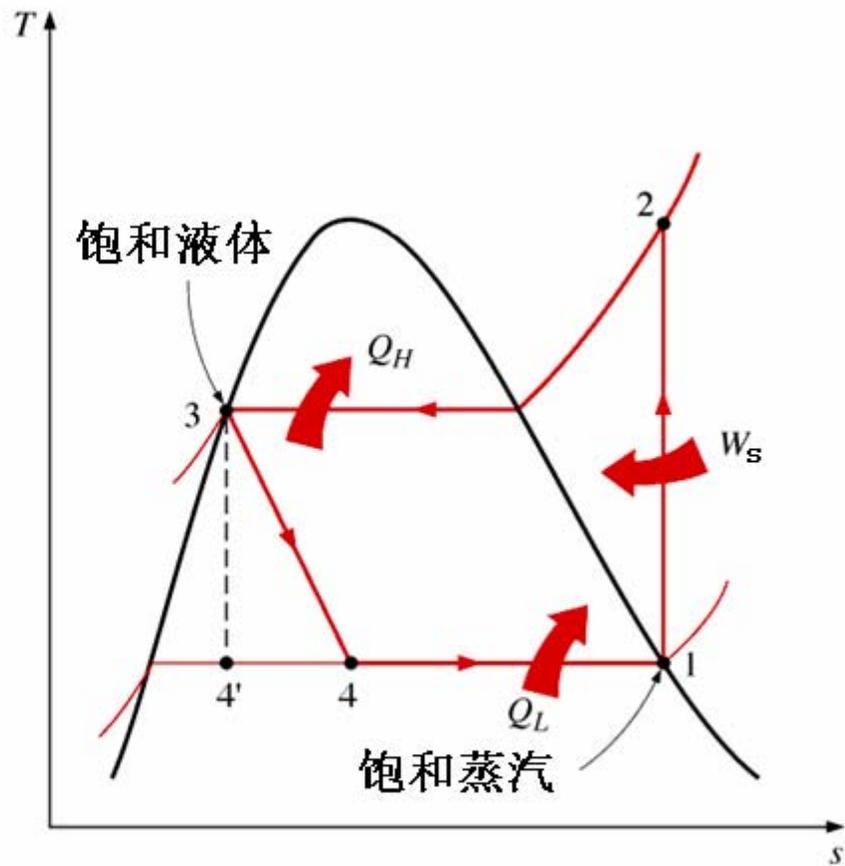
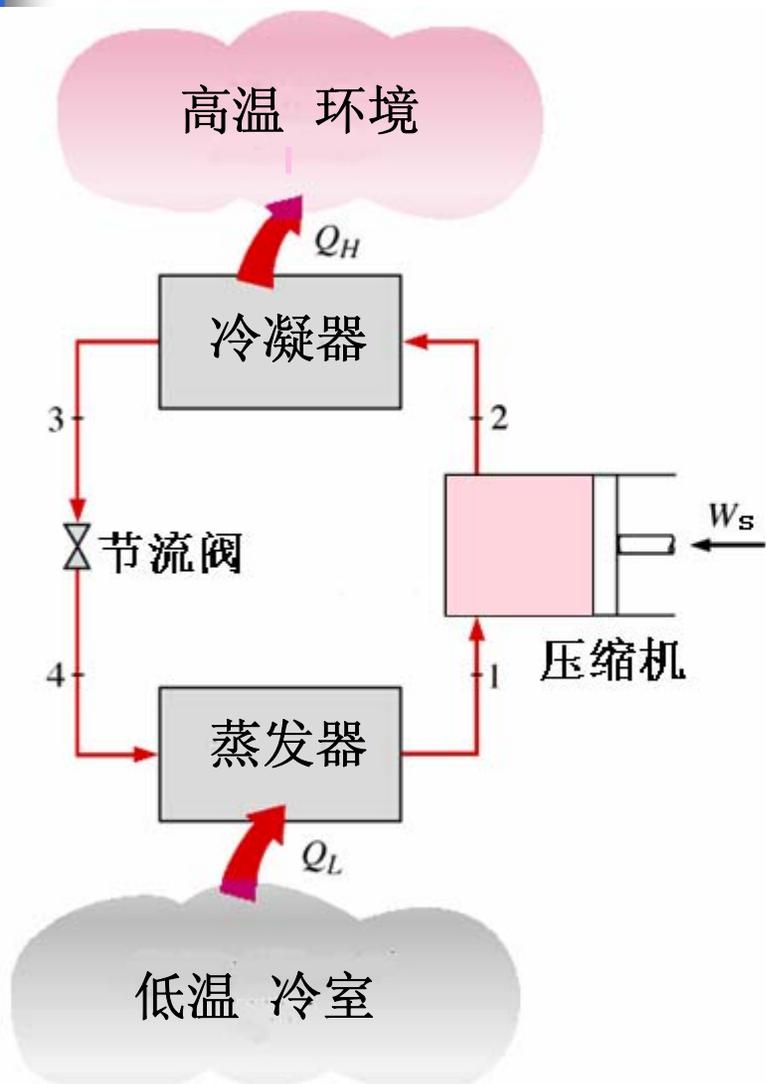
实际：等焓（节流阀）

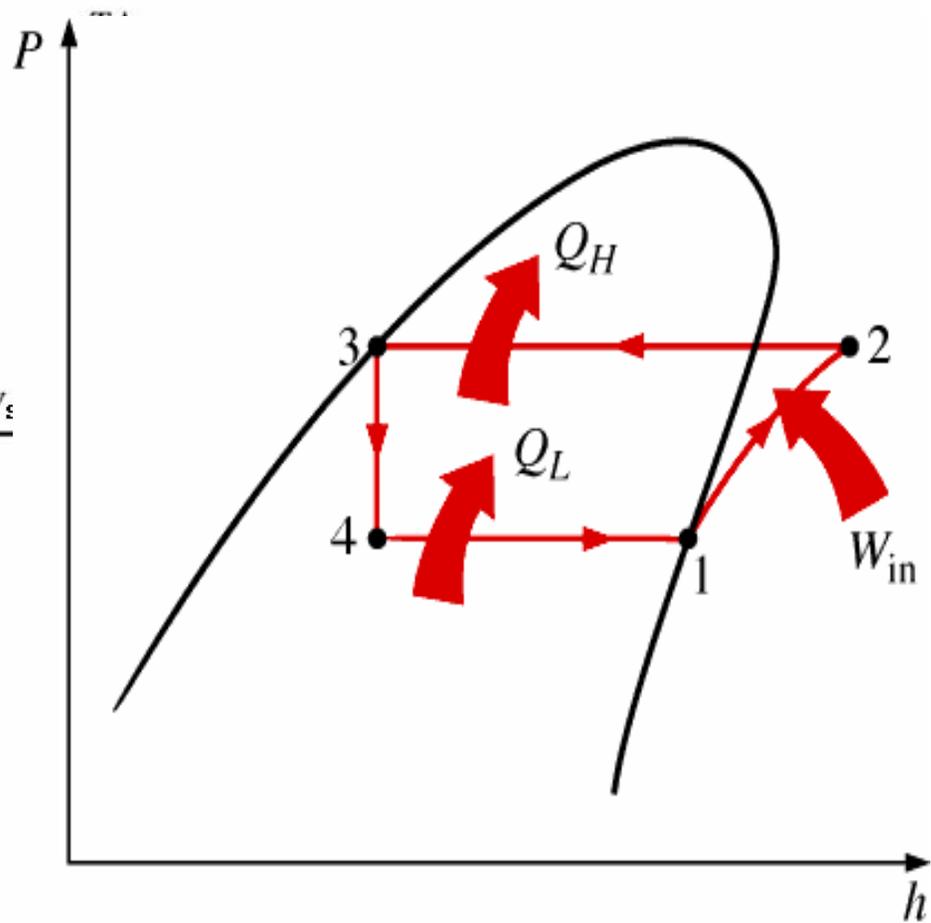
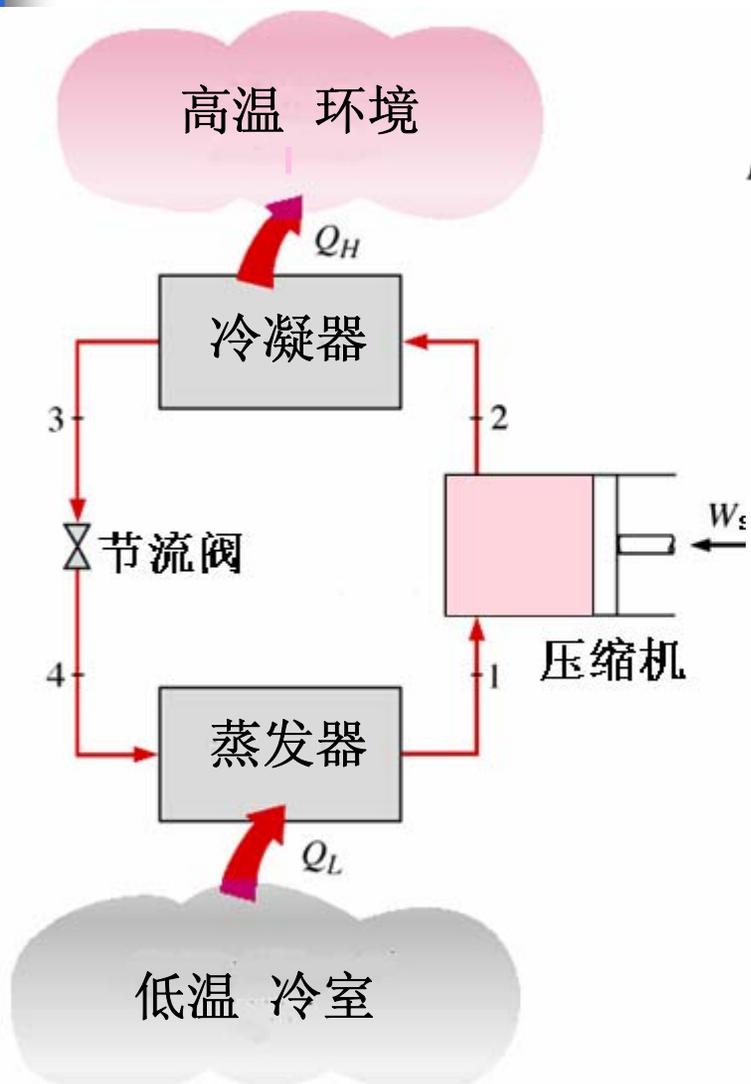
实际压缩制冷循环：12341

理想压缩制冷循环：12''3'4''1

卡诺压缩制冷循环：1'2'3'4'1'









对于实际压缩制冷循环，经历的

1——2 对应于压缩机

（工厂：冰机，氨压机，制冷机）

2——3 冷凝器进行

在冷凝器里，冷却水（或空气）把工质的热量带走，使其由高压气体转变成高压液体。

3——4 节流阀进行

（冰箱毛细管）

4——1 蒸发器进行

大盐水槽供热（冰箱食物热）

## 2. 压缩制冷过程的热力学计算

- ① 单位冷冻量：1kg制冷剂在循环过程中所提供的冷量。

$$q_0 = H_1 - H_4 \quad \text{kJ/kg}$$

- ② 冷凝器的单位热负荷  $q_H = H_3 - H_2 \quad \text{kJ/kg}$

- ③ 单位耗功量  $W_s = H_2 - H_1 \quad \text{kJ/kg}$

- ④ 制冷系数  $\varepsilon = \frac{q_0}{w_s} = \frac{H_1 - H_4}{H_2 - H_1}$

- ⑤ 冰机的制冷能力 $Q_0$

$$Q_0 = Gq_0 = G(H_1 - H_4) \quad \text{kJ/h}$$

G——制冷剂循环量

1冷冻吨=每天将273.16K的1吨水凝结为同温度的冰所需取走的热量。

由于1kg水凝结为冰要放出334.5 kJ的热量

$$\therefore 1 \text{ 冷冻吨} = 1 \times 10^3 \times 334.5 / 24 = 1.394 \times 10^4 \text{ kJ/h}$$

⑥ 制冷剂循环量  $G = Q_0 / q_0 \quad \text{kg/h}$

⑦ 冷凝器的热负荷  $Q_H = G q_H \quad \text{kJ/h}$

$Q_H$ 是设计冷凝器的基本依据。

⑧ 压缩机的轴功率  $N_T = G w_s / 3600 \quad \text{Kw}$

$$\because G = Q_0 / q_0 \quad w_s = q_0 / \varepsilon$$

$$\therefore N_T = \frac{Q_0}{q_0} \frac{q_0}{\varepsilon \times 3600} = \frac{Q_0}{\varepsilon \times 3600} \quad \text{Kw}$$



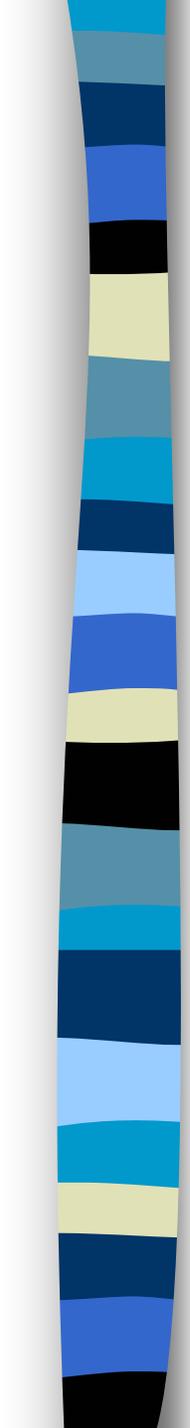
# 计算举例

- [P148—151      例6-7~6-9]

### 3. 制冷剂的选择

#### ■ 选择原则：P149五条

- 大气压力下沸点低；
- 常温下的冷凝压力应尽可能的低，以降低对冷凝器的耐压与密封的要求；
- 汽化潜热大，减少制冷剂的循环量，缩小压缩机的尺寸；
- 具有较高的临界温度与较低的凝固温度，使大部分的放热过程在两相区内进行；具有化学稳定性、不易燃、不分解、无腐蚀性。



## 4. 载冷体的选用

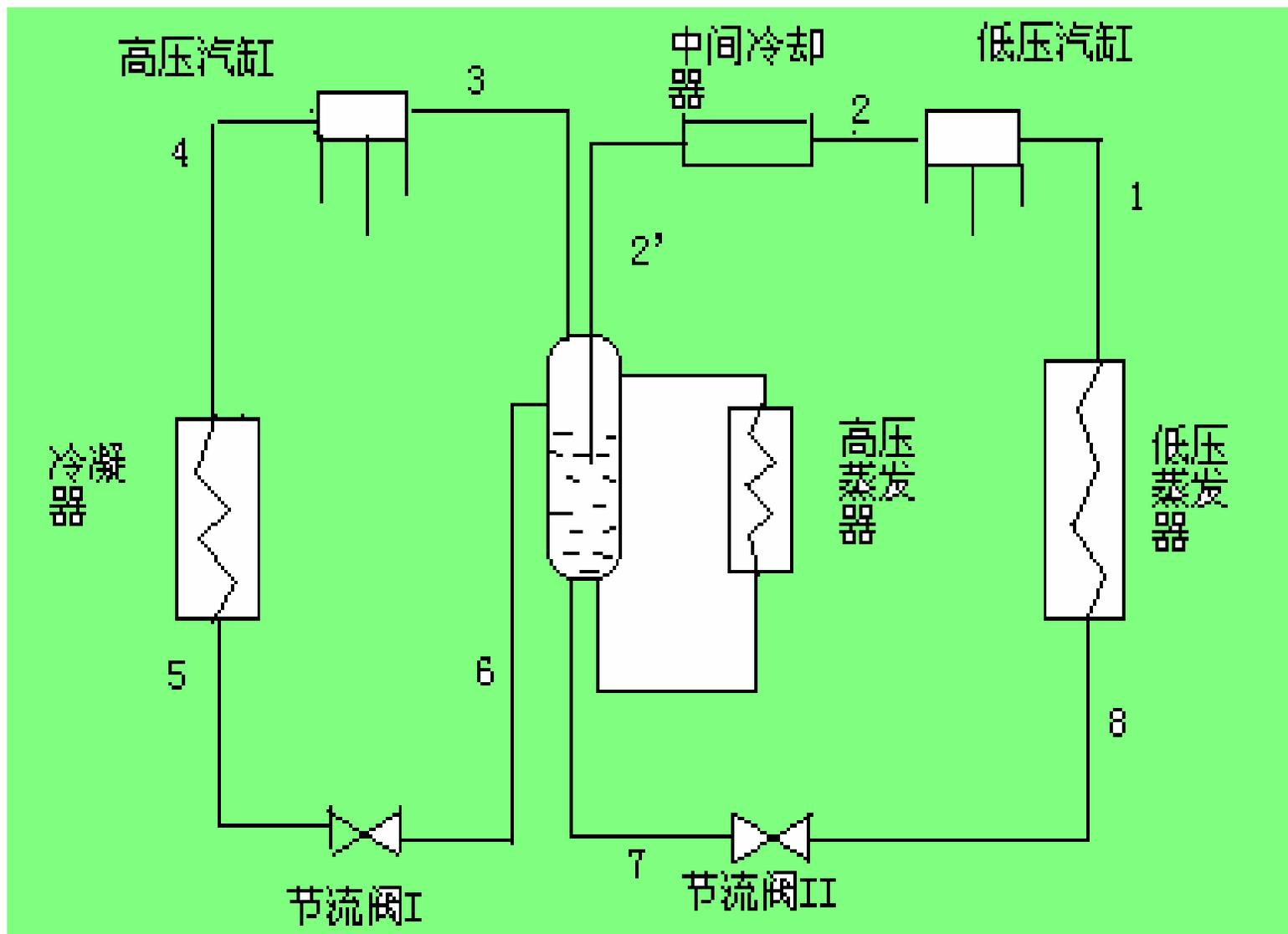
- 工业上一般选用冷冻盐水 $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$

## 三. 多级压缩制冷和复迭式制冷

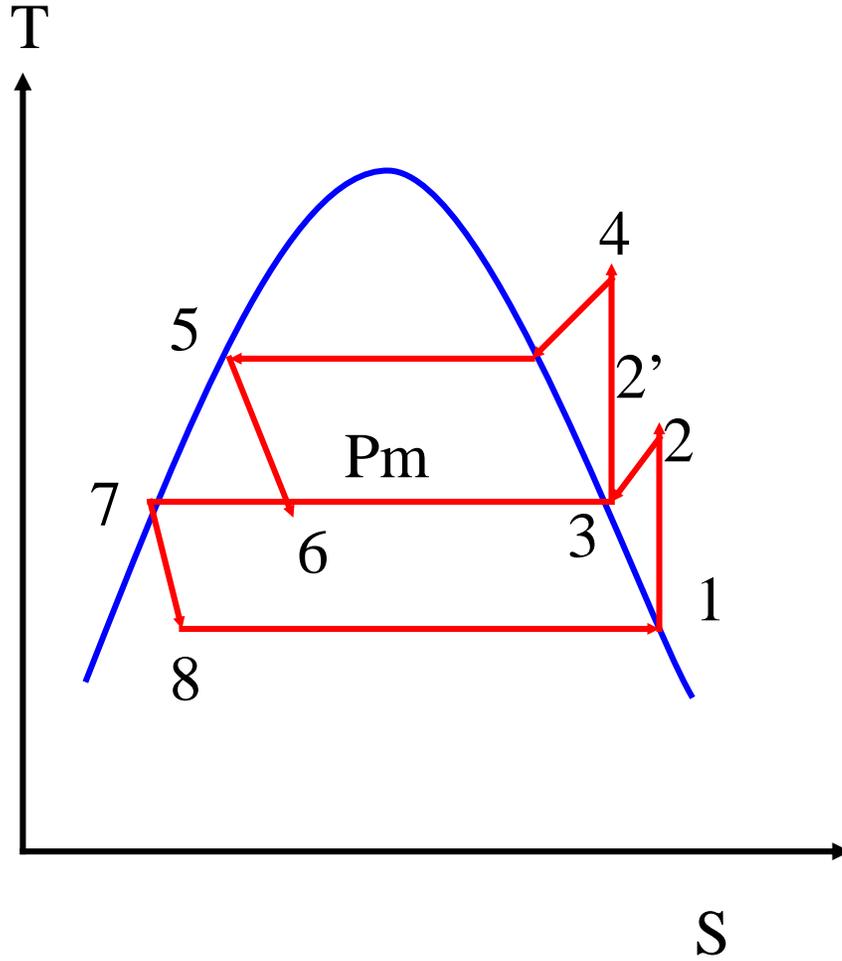
- 在氨制冷剂中，一般蒸发温度低于 $-30^{\circ}\text{C}$ 时，采用两级压缩
- 低于 $-45^{\circ}\text{C}$ 时，采用三级压缩

### 1. 两级压缩制冷循环

#### (1) 工作原理及T-S图



## (2) 两级压缩两级蒸发的好处



① 耗功小，节能

② 制冷率大

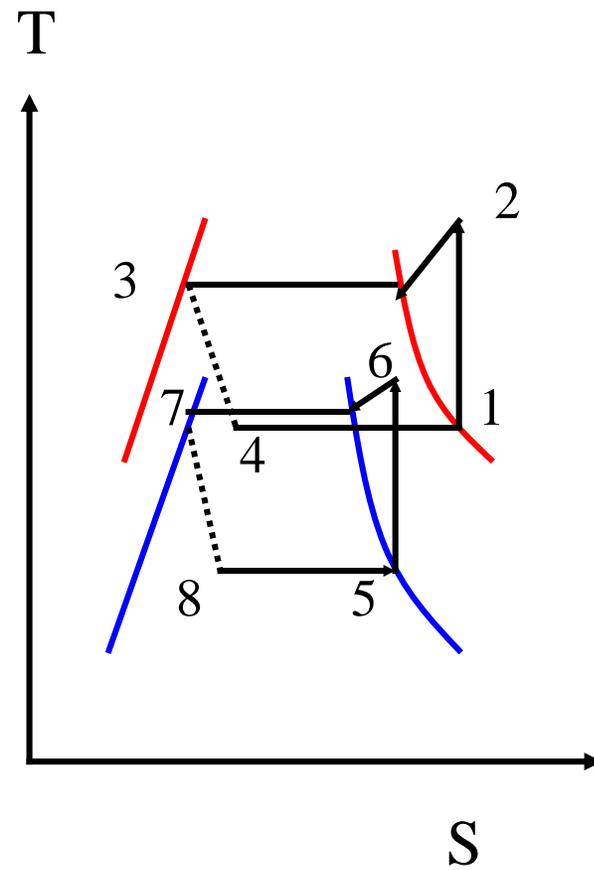
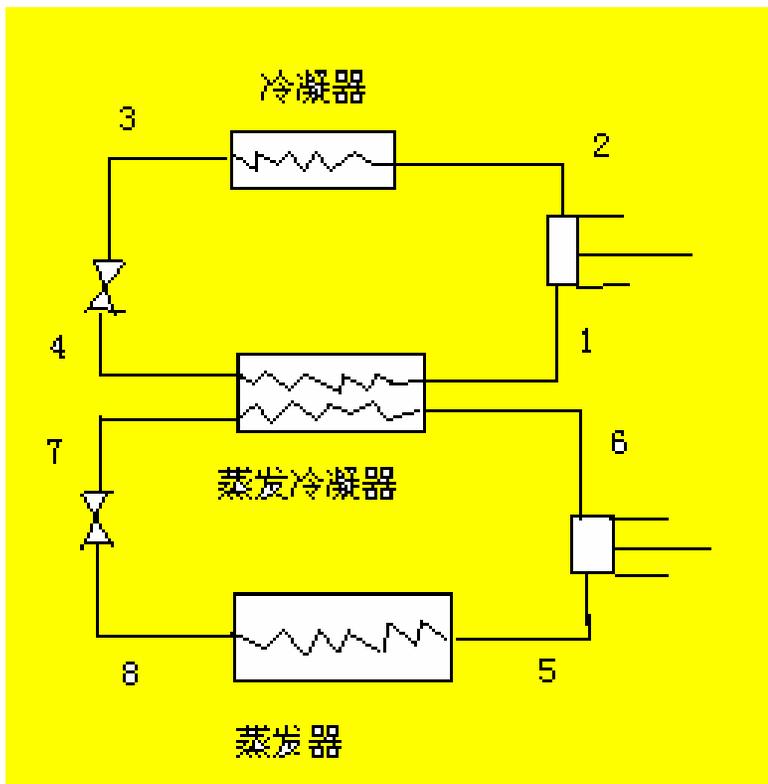
③ 思考一下二级压缩  
三级蒸发的原理图？

温度的低温

## 2. 复迭式制冷

- (1) 目的：为了得到更低的制冷温度
- (2) 特点：
  - ① 使用两种（或两种以上）制冷剂；
  - ② 各自构成独立的制冷循环；
  - ③ 低温度级的蒸发器是更低温度级的冷凝器。

### (3) 工作原理及T-S图

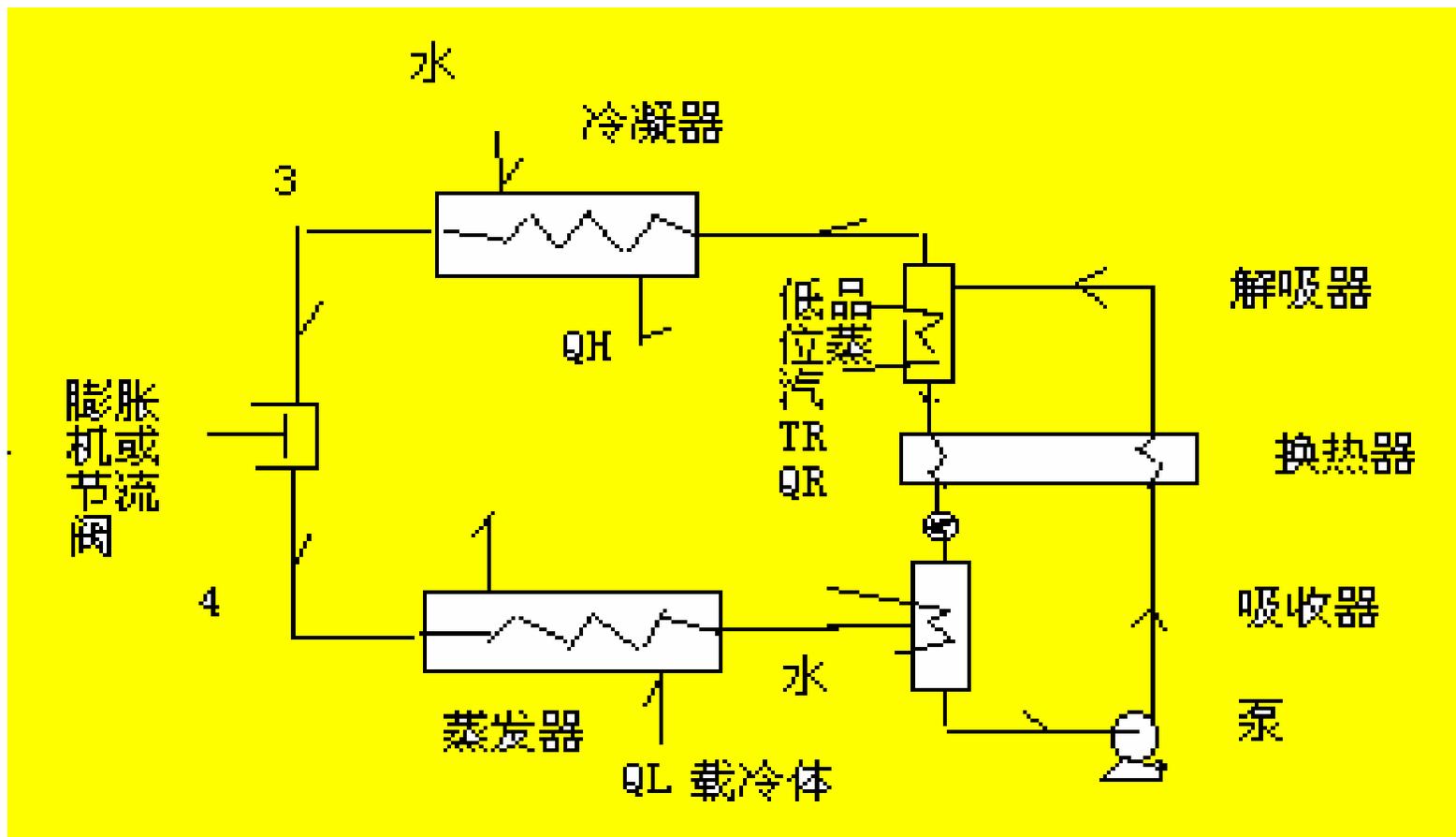


## (4) 对两种制冷剂的要求

- (如氨、乙烯组成的复迭式制冷)
- ① 低温循环的制冷剂 ( $\text{NH}_3$ ) 蒸发温度  $>$  更低温度制冷剂的凝固温度  $T_s$ ;
- ② 更低温循环的制冷剂 (乙烯) 冷凝温度  $<$  低温循环的制冷剂 ( $\text{NH}_3$ ) 的临界温度  $T_c$ ;
- ③ 更低温循环制冷剂的冷凝  $T >$  低温制冷蒸发的温度.

# 四. 吸收式制冷

## 1. 吸收式制冷的工作原理





将吸收式制冷循环与蒸汽压缩制冷循环相比较，其**不同点**仅在于：

**蒸汽压缩制冷循环：压缩机（消耗机械功）**

**吸收式制冷循环：**

**吸收塔，解吸器，换热器，泵（消耗低品位热量）**

## 2. 评价吸收式制冷循环的经济指标

用于评价吸收式制冷循环的经济指标是热力系数  
(能量利用系数)

$$\xi = \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{\text{制冷量 } Q_0}{\text{低品位蒸汽供热量}}$$

最大热力系数:

$$\xi = \frac{Q_L}{Q_H} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \cdot \frac{T_R - T_H}{T_R}$$

## 五.热泵

$$\mathcal{E}_{HP} = \frac{Q}{W_s}$$

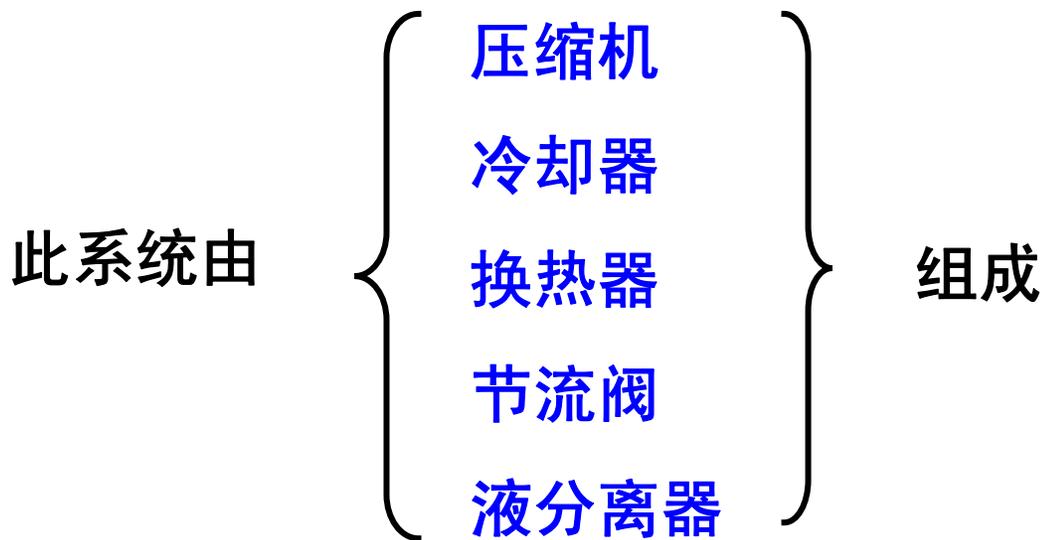
## 6.4 深冷循环（气体液化循环）

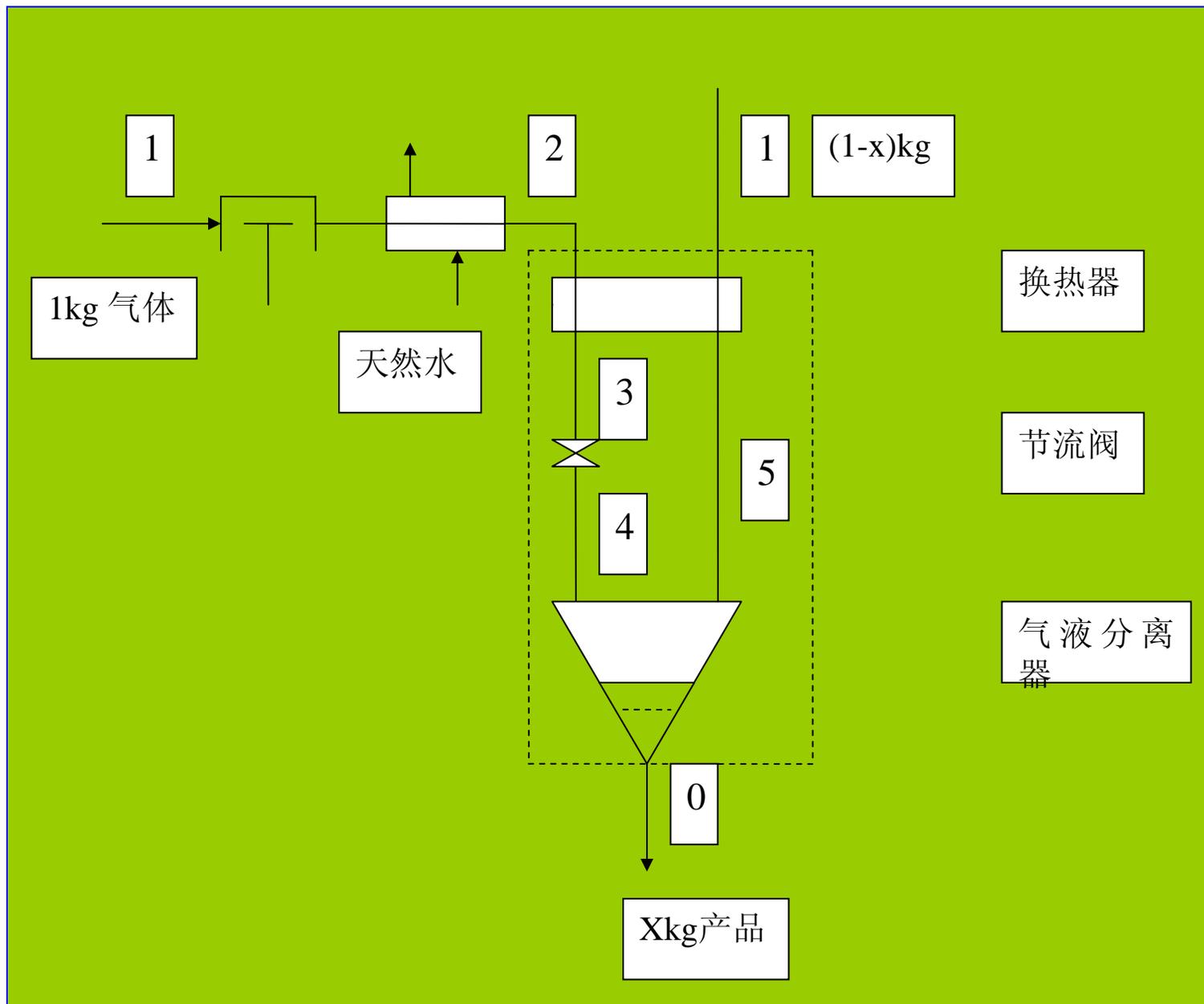
- 深度冷冻循环的目的就是获得低温度液体。
- 当气体温度高于其临界温度时，无论加多大的压力都不能使其液化。因此，气体的临界温度越低，所需要的液化温度越低。
- 如：氮气  $T_c=126.2\text{K}(-146.95^\circ\text{C})$
- 氢气  $T_c=33.2\text{K}(-249.95^\circ\text{C})$
- 利用一次节流膨胀液化气体是最简单的气体液化循环。

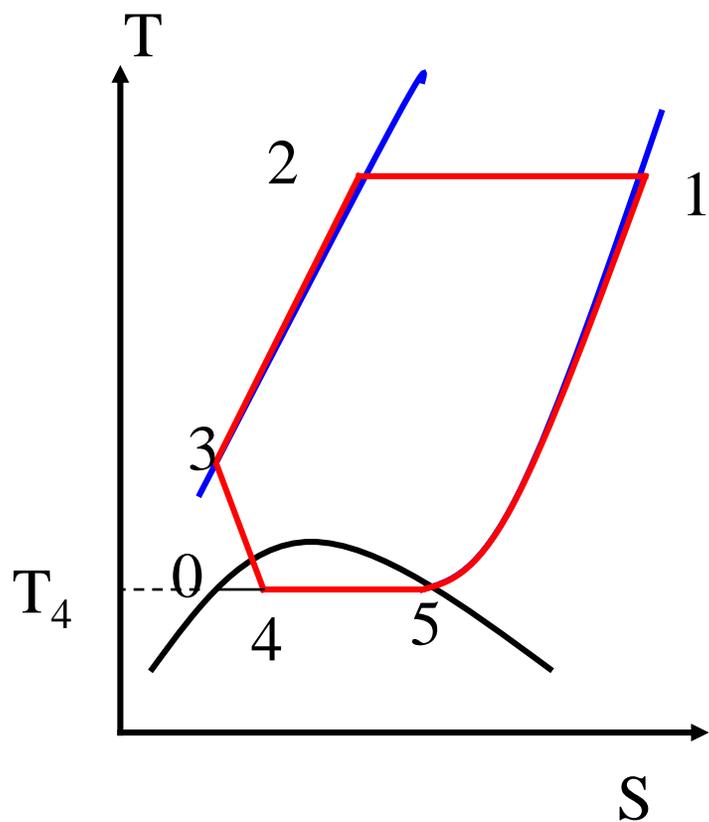
# 一. Linde Cycle (林德循环)

- 1895年德国工程师Linde (林德) 首先应用此法液化空气，故称简单的林德循环。

## 1. 工作原理及T-S图







这是操作稳定时所表示的T-S图。从这一图示来看，**深冷与普通冷冻循环主要区别**表现在：

**普冷：**两个封闭式循环。制冷循环与被冷物系是两种物质，彼此独立封闭循环。

**深冷：**制冷循环与分离或液化物质是同一种物质，且是不封闭循环。

## 2. 热力学计算

- 以处理1kg气体为基准
- (1) 气体液化量（液化率） $x$
- 所谓液化率：1kg被处理的气体所能产生的液体kg数。
- 取换热器、节流阀、气液分离器为研究体系

由热力学第一定律： $\Delta H = Q + W_s$

因体系与环境无轴功交换，若无冷损失，

$$W_s = 0 \quad Q = 0$$

由体系的能量平衡，则有  $\Delta H = 0$

$$\rightarrow \sum H_{\lambda} = \sum H_{\text{出}}$$

$$\therefore H_2 = xH_0 + (1-x)H_1$$


$$x = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_0} \quad (6-26) \text{ 理论液化量}$$

$$x = \frac{H_1 - H_2 - q_2 - q_3}{H_1 - H_0} \quad (6-29) \text{ 实际液化量}$$

$$q_2 = (1 - x) \overline{C_p} \Delta T \quad (\text{换热器不完全交换})$$

$\overline{C_p}$  — 低压气体平均热容

$\Delta T$  — 换热器热端温差

$q_3$  — 冷量损失。这是由于气体液化装置绝热不完全，环境介质热量传给低温设备而引起的冷量损失。

## (2) 制冷

量。在稳定操作下，液化 $x$ kg气体所取走的热量。

理论制冷量： $q_o = x(H_1 - H_o) = H_1 - H_2$

实际制冷量： $q_o = x(H_1 - H_o) - q_2 - q_3 = H_1 - H_2 - q_2 - q_3$

## (3) 功耗 $W_s$

按理想气体的可逆等温压缩  $W_s = RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$  (6-28) 理想

$W_s = \frac{RT_1}{\eta_T} \ln \frac{p_2}{p_1}$  实际耗功

式中： $R$ —气体常数，单位取kJ/kg•K

$\eta_T$  —压缩机的等温压缩效率，一般按经验可取0.59

$P_1$ 、 $T_1$ —被液化气体初态的压力、

温度

$P_2$ —被液化气体压缩后的压力

#### (4) 比功 $W_x$

每液化1kg气体所消耗的功称为比功。

$$W_x = \frac{W_s}{x} = \frac{RT_1}{\eta_T x} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

#### (5) 制冷系数 $\varepsilon$

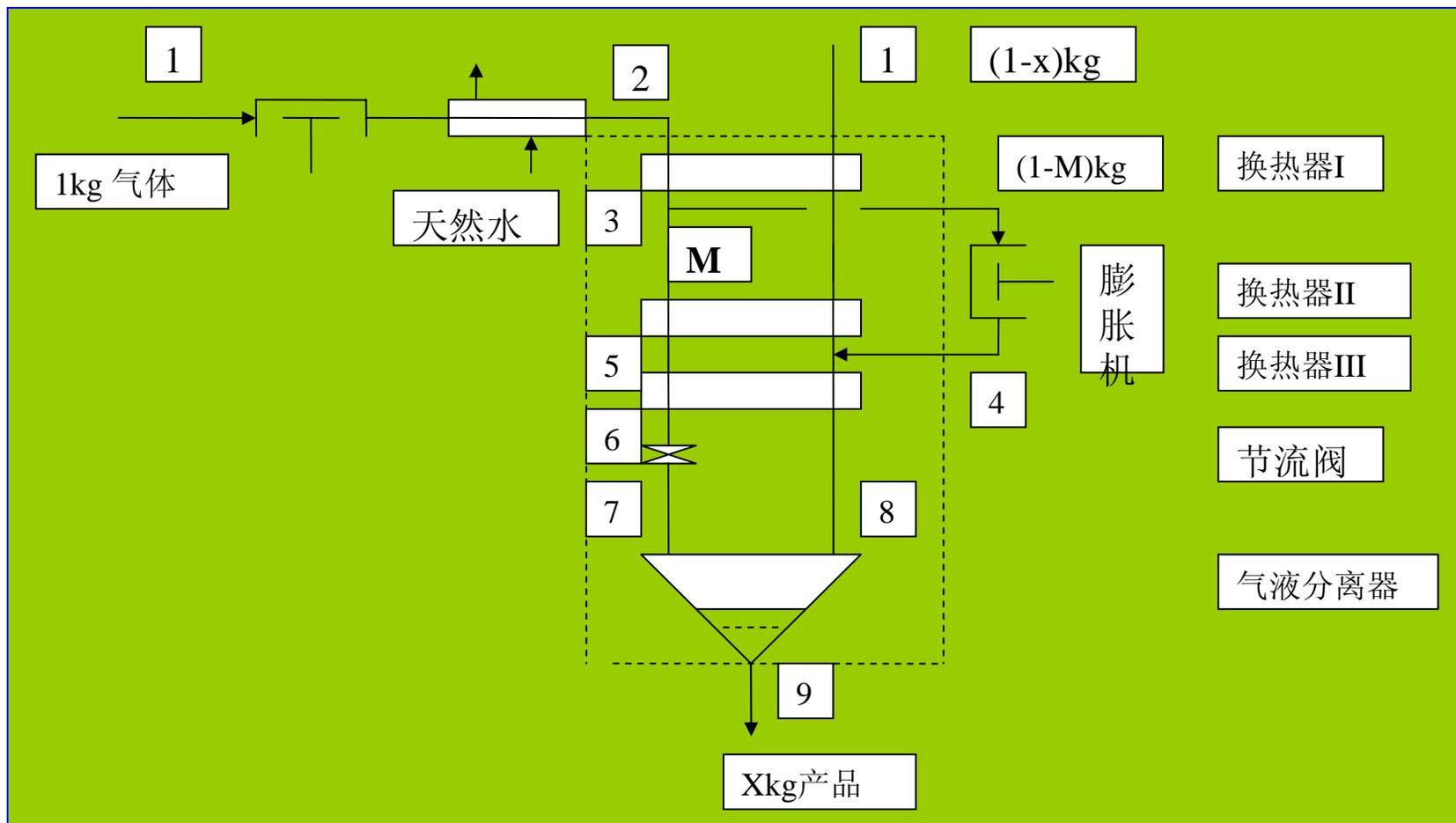
$$\varepsilon = \frac{q_o}{W_s} = \frac{H_1 - H_2}{W_s} = \frac{x(H_1 - H_o)}{W_s} = \frac{H_1 - H_o}{W_x}$$

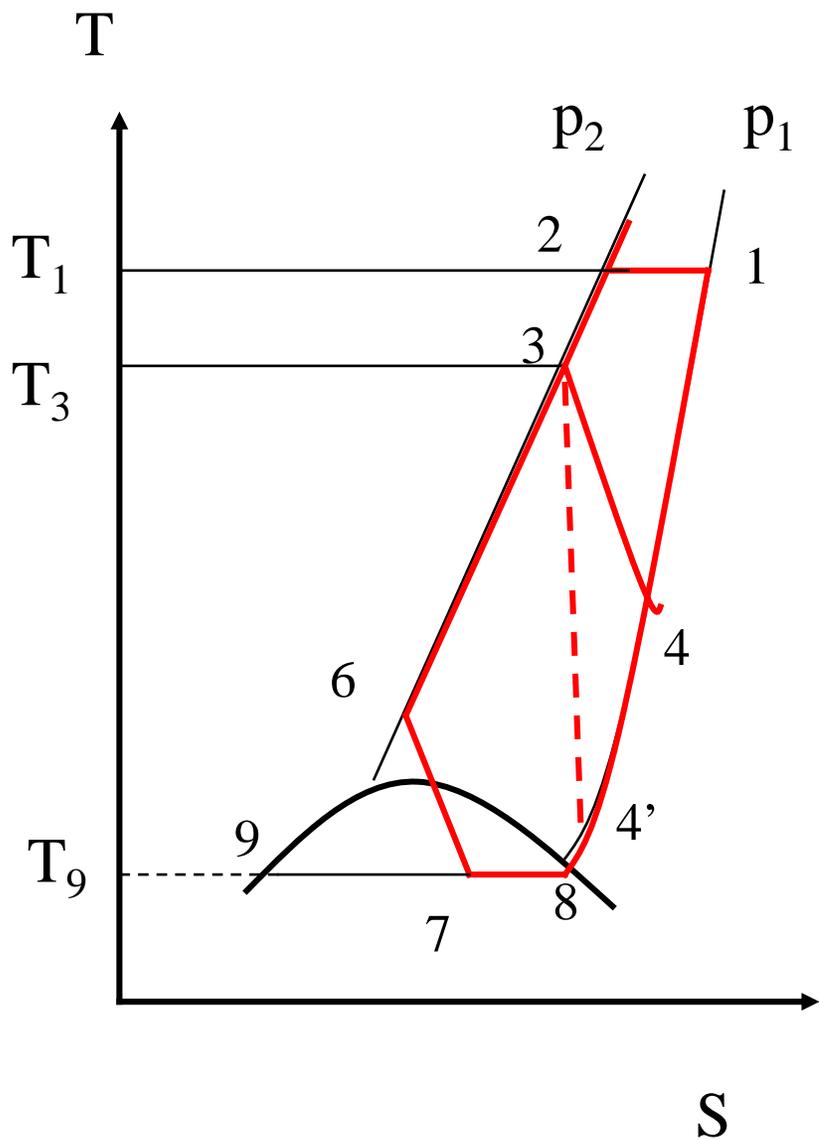
#### 问题:

- 一次节流液化循环比较简单，但效率很低。目前只有小型气体分离、液化装置如小型空分装置还有采用。
- 在简单的林德循环中，由于高压气体的相对量大和热容大，用未冷凝低压气体无法将其冷却到足够的低温。

## 二. 克劳德循环

### 1. 工作原理及T-S图





劳德循环的**优点**主要表现在:

1) 减少了高压气体的量, 增加了作为冷却介质的低压气体大量;

2) 提高了液化率;

## 2. 热力学计算

### (1) 液化量 $x$

以图中虚线作为研究体系

由热力学第一定律： $\Delta H = Q + W_s$

体系与环境无轴功交换，无冷损失

$$W_s = 0 \quad Q = 0$$

由体系的能量平衡，则有  $\Delta H = 0$

$$\sum H_{\lambda} = \sum H_{\text{出}}$$

$$\sum H_{\lambda} = H_2 + (1 - M)H_4$$

$$\sum H_{\text{出}} = (1 - M)H_3 + xH_9 + (1 - x)H_1$$



$\therefore x = \frac{(H_1 - H_2) + (1 - M)(H_3 - H_4)}{H_1 - H_9}$

若考虑不完全热交换损失 $q_2$ 和系统的冷损失 $q_3$

实际:

$$x = \frac{(H_1 - H_2) + (1 - M)(H_3 - H_4) - q_2 - q_3}{H_1 - H_9}$$

## (2) 制冷量 $q_o$

理论:  $q_o = (H_1 - H_2) + (1 - M)(H_3 - H_4)$

实际:  $q_o = (H_1 - H_2) + (1 - M)(H_3 - H_4) - q_2 - q_3$

与林德循环相比较, 制冷量多出  $(1 - M)(H_3 - H_4)$  kg

### (3) 功耗 $W_s$

理想: 
$$W_s = RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1} - (1 - M)(H_3 - H_4')$$

实际: 
$$\begin{aligned} W_s &= \frac{RT_1}{\eta_T} \ln \frac{p_2}{P_1} - (1 - M)(H_3 - H_4)\eta_m \\ &= \frac{RT_1}{\eta_T} \ln \frac{p_2}{p_1} - \eta_s (1 - M)(H_3 - H_4')\eta_m \end{aligned}$$

式中:  $\eta_s$ —等熵膨胀效率

$M$ —未进入膨胀机的气体分率

$\eta_m$ —膨胀机的机械效率

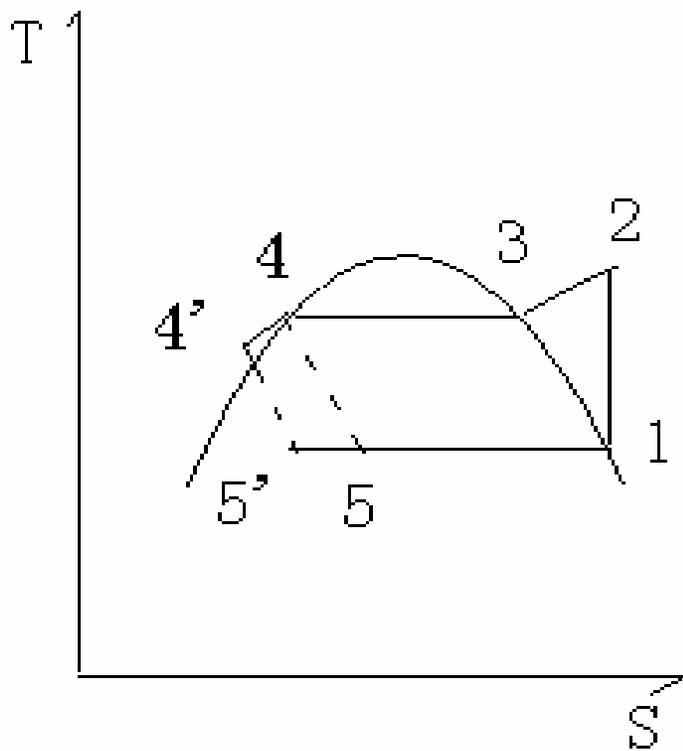
$R$ —气体常数, 单位取 $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$

$\eta_T$  —压缩机的等温压缩效率, 一般按经验可取0.59

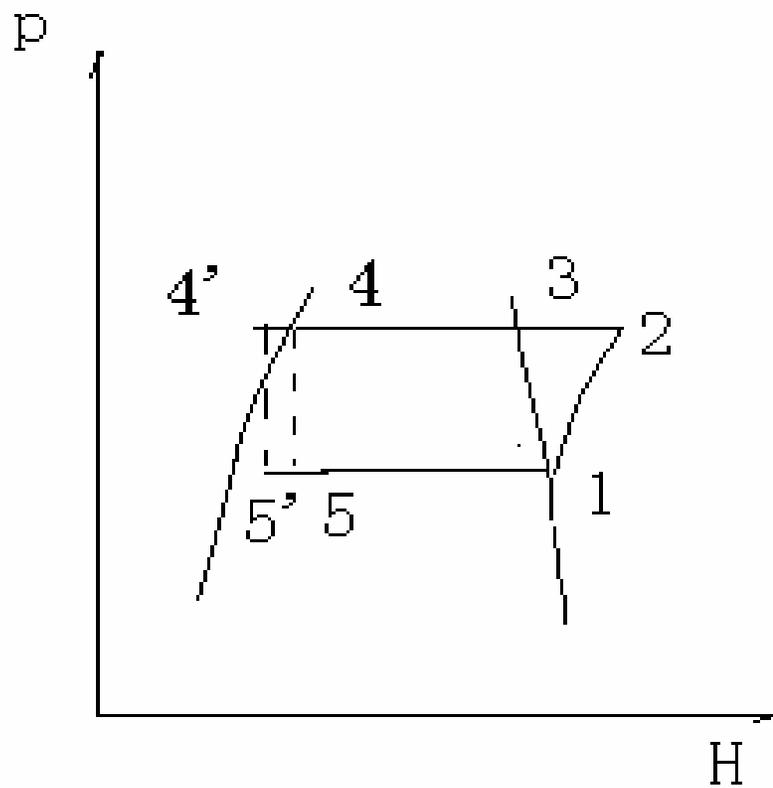


### 三. 应用举例

- [P115-158 例6-10~6-11] 自看



T-S图



p-H图